

# 基于 Hamilton 能量理论的 含 STATCOM 的非线性控制器设计

魏云冰, 杨位杰

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**针对含有静止同步补偿器(STATCOM)的单机无穷大系统,对其同步发电机建立实用的数学模型.从能量的观点出发,应用能量函数理论构造 Hamilton 能量函数,设计了 STATCOM 接入点电压与发电机励磁非线性控制器.该控制器直接使用系统能量作为储存函数,在平息系统扰动能力和快速稳定性上比其他常规控制器的控制性能优越.设计中完整地保留了系统的非线性控制结构,不需要线性化处理,比各种线性化设计方法具有更好的调节能力和鲁棒性.仿真结果表明,该控制器在系统遭受三相短路故障的情况下,能够比常规 PID 控制更有效地抑制干扰,更快地满足发电机励磁与 STATCOM 接入点电压的暂态稳定性.

**关键词:**静止同步补偿器;Hamilton 能量函数;单机无穷大系统;非线性控制

**中图分类号:**TM714.3      **文献标志码:**A      **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.03.017

## Design of nonlinear controller of STATCOM based on Hamilton energy theory

WEI Yun-bing, YANG Wei-jie

(College of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** The practical mathematic model of synchronous generator was established in the static synchronous compensator(STATCOM) of single machine infinite bus power system. Based on Hamilton energy theory, the new nonlinear controller was designed between the STATCOM which was installed in bus voltage of system and synchronous machine excitation. This controller directly uses the energy as the storage function. Compared with other nonlinear controllers, this controller has the advantage of the fast stability and the capability of quelling the disturbance. Since the nonlinear control structure retains all in this design, it does not need the linearization. The proposed STATCOM controller is more robust than linear control method. The simulation results showed that the proposed controller could faster meet generator excitation and STATCOM access point voltage transient stability than conventional PID control under the subjection to the three-phase short circuit fault.

**Key words:** static synchronous compensator; Hamilton energy function; single machine infinite bus system; nonlinear control

收稿日期:2013-03-03

作者简介:魏云冰(1970—),男,江苏省徐州市人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为电机故障检测与智能决策.

## 0 引言

静止同步补偿器(STATCOM)是采用自换相电力半导体桥式变流器进行发生和吸收无功功率的动态补偿装置.在柔性交流输电(FACTS)系统中采用多电平、多重化和PWM技术等措施后,STATCOM可大大减少补偿电流的谐波含量. STATCOM以其平滑的无功调节、快速的动态特性成为电力系统动态无功补偿装置的发展方向,受到国内外科研与工程领域的广泛关注<sup>[1-3]</sup>.但是,STATCOM系统具有非线性、强耦合、参数时变等特性,用传统的控制方法很难达到满意的控制效果.为此,研究性能更优的控制策略以提高STATCOM的补偿性能具有很强的工程实用价值<sup>[4-5]</sup>.

近年来,Hamilton理论在非线形控制上优势明显,Hamilton能量系统理论越来越受到电力工作者的重视,并进行了广泛的研究<sup>[6-7]</sup>.文献[8-10]运用Hamilton函数构建了满足电力系统稳定性系统.本文拟应用Hamilton能量理论对包含STATCOM的单机无穷大电力系统进行系统稳定控制器设计.

## 1 Hamilton系统控制器模型

一般的非线性系统形式可描述为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \end{cases}$$

其中, $\mathbf{x} \in R^n$ 表示系统的状态向量; $\mathbf{f}:R^n \rightarrow R^n$ 和 $\mathbf{g}:R^n \rightarrow R^{n \times m}$ 均为连续可微的函数向量; $\mathbf{u}, \mathbf{y} \in R^m$ 分别是系统的输入与输出向量; $\mathbf{h}:R^n \rightarrow R^p$ 为光滑函数.设 $x^*$ 为系统的渐近稳定平衡点,满足 $\mathbf{f}(x^*) = \mathbf{0}$ .整个系统的Hamilton函数为 $\dot{H}(\mathbf{x}) = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} \dot{\mathbf{x}}$ ,将Hamilton

系统扩展成为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})] \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{g}^T(\mathbf{x}) \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \end{cases} \quad (1)$$

其中,状态变量 $\mathbf{x}^T = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in R^n$ ; Hamilton函数 $H(\mathbf{x})$ 是半正定函数,表示系统能量; $\mathbf{u}$ 是控制输入信号; $\mathbf{y}$ 为控制输出信号. $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{R}(\mathbf{x})$ 分别是满足如下条件的反对称结构矩阵和非负对称阻尼, $\mathbf{J}(\mathbf{x}) = -\mathbf{J}^T(\mathbf{x}), \mathbf{R}(\mathbf{x}) = \mathbf{R}^T(\mathbf{x}) \geq \mathbf{0}, \forall \mathbf{x}$ , Hamilton系统满足以下功率平衡等式:

$$\dot{H} = -\frac{\partial^T H}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x})\mathbf{R}(\mathbf{x}) \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{u}^T \mathbf{y}$$

其中, $\mathbf{u}^T \mathbf{y}$ 表示系统的外置能量供应系统; $-\frac{\partial^T H}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x})\mathbf{R}(\mathbf{x}) \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}$ 表示系统中电阻元件的能量耗散;当 $\mathbf{u} = \mathbf{0}$ 时,有

$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})] \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \quad (2)$$

$$\dot{H} = -\frac{\partial^T H}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x})\mathbf{R}(\mathbf{x}) \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} \leq \mathbf{0} \quad (3)$$

若 $x^*$ 是 $H(\mathbf{x})$ 的极小值点,则 $x^*$ 是式(2)的一个平衡点,再由式(3)知式(2)在平衡点 $x^*$ 是稳定的,并且当式(1)是零状态可检测时,存在控制策略

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{g}^T(\mathbf{x}) \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}$$

其中, $\mathbf{K}$ 为正定矩阵,使非线性动态系统在平衡点 $x^*$ 处渐近稳定.

**证明** 对于Hamilton函数 $H(\mathbf{x})$ ,在上式的作用下

$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x}) - \mathbf{g}\mathbf{K}\mathbf{g}^T] \frac{\partial H(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}$$

所以

$$\begin{aligned} \dot{H}(\mathbf{x}) &= \left(\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}\right)^T \dot{\mathbf{x}} = \left(\frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}\right)^T (-\mathbf{R}) \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}} + \\ &\quad \left(\mathbf{g}^T \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}\right)^T (-\mathbf{K}) \left(\mathbf{g}^T \frac{\partial H}{\partial \mathbf{x}}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

由 $\mathbf{R}$ 是半正定矩阵, $\mathbf{K}$ 是正定矩阵可知 $\dot{H}(\mathbf{x}) \leq 0$ ,故 $H$ 是闭环反馈系统(4)的一个Lyapunov函数.由不变集原理可知,在控制率 $\mathbf{u}$ 的作用下,受控非线性动态系统(1)在平衡点 $x^*$ 处渐近稳定.

## 2 包含STATCOM的非线性控制策略

### 2.1 同步发电机的数学模型

在电力系统中,包含STATCOM的单机无穷大系统如图1所示.该系统在传输线中装有STATCOM,原动机的输入机械功率 $P_m$ 为常数,该发电机采用三阶模型;STATCOM采用一阶延时可控无功电流源模型,并假设输出电流与接入点电压的频率一致.令 $d$ 轴始终与接入点电压向量同相, $q$ 轴超前 $90^\circ$ ,则STATCOM输出电流只含 $q$ 轴分量,具有STATCOM的单机无穷大系统的非线性方程为

$$\begin{cases} \delta = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0 P_m}{M} - \frac{\omega_0 P_e}{M} - D \frac{\omega - \omega_0}{M} \\ \dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} (-E_q + U_f) \end{cases}$$

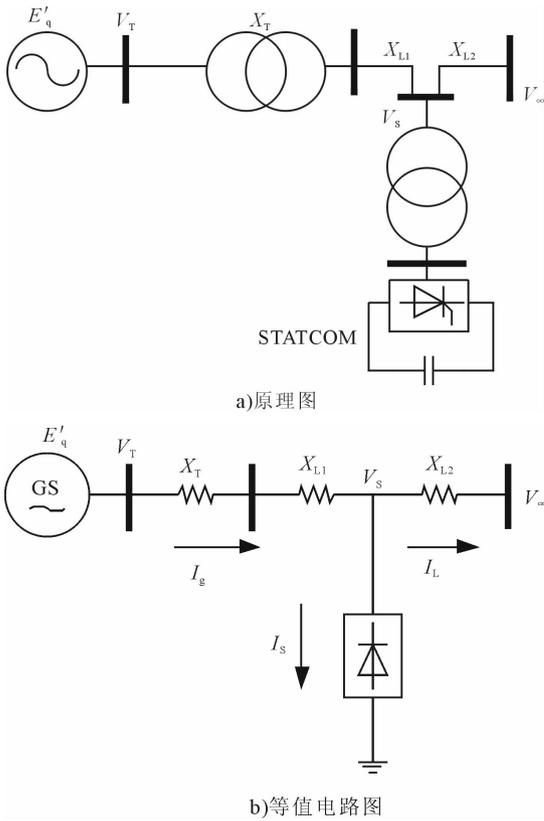


图1 具有 STATCOM 的单机无穷大系统

其中,  $\delta$  是发电机转子角 /rad;  $\omega$  是发电机转子角速度 /( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $\omega_0 = 2\pi f$  为同步角速度 /( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $D$  为发电机阻尼系数;  $M$  是转动惯量;  $U_f$  为励磁电压 /pu;  $P_e$  为输入机械功率 /pu;  $E_q$  是电磁功率 /pu;  $E_q$  是  $q$  轴空载电势 /pu;  $E'_q$  是  $q$  轴暂态电势 /pu;  $T'_{d0}$  是励磁绕组的时间常数 /s.

发电机送入单机无穷大系统的有功功率方程为

$$P_e = \frac{V_\infty E'_q}{X'_{d\Sigma}} \sin\delta$$

其中,  $X'_d$  是  $d$  轴暂态电抗. 又因为

$$i_d = \frac{E_q - V_\infty \cos\delta}{X_{d\Sigma}}$$

其中,  $X_d$  是  $d$  轴电抗. 根据

$$E_q = E'_q + (X_d - X'_d) i_d$$

有关系式

$$E_q = \frac{X_{d\Sigma}}{X'_{d\Sigma}} E'_q - \frac{X_q - X'_d}{X'_{d\Sigma}} V_\infty \cos\delta$$

最后,发电机的转子运动方程可描述为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{M} P_m - \frac{\omega_0}{M} \frac{V_\infty E'_q}{X'_{d\Sigma}} \sin\delta - D \frac{\omega - \omega_0}{M} \\ \dot{E}'_q = -\frac{X_{d\Sigma}}{T'_{d0} X'_{d\Sigma}} E'_q + \frac{X_d - X'_d}{T'_{d0} X'_{d\Sigma}} V_\infty \cos\delta + \frac{1}{T'_{d0}} U_f \end{cases} \quad (5)$$

选取控制变量:  $a = V_\infty / X'_{d\Sigma}$ ,  $b = X_{d\Sigma} / X'_{d\Sigma}$ ,  $U = U_f$ ,  $c = (X_d - X'_d) V_\infty / X'_{d\Sigma}$ , 令  $x_1 = \delta$ ,  $x_2 = \omega - \omega_0$ ,  $x_3 = E'_q$ , 则式 (5) 可转化为

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

其中

$$f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ [(P_m - aE'_q \sin\delta)\omega_0 + Dx_2] / M \\ a \cos\delta + abE'_q / c \end{bmatrix}$$

$$g(x) = [0 \quad 0 \quad 1/T'_{d0}]^T$$

## 2.2 基于 Hamilton 函数的励磁控制器设计

由以上分析可以看出,单机无穷大同步电机的转子运动方程可写为

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\omega} \\ \dot{E}'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{M} & 0 \\ -\frac{1}{M} & -\frac{D}{M^2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{c}{aT'_{d0}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -(P_m - aE'_q \sin\delta)\omega_0 \\ M(\omega - \omega_0) \\ a \cos\delta + \frac{ab}{c} E'_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T'_{d0}} \end{bmatrix} U_f \quad (6)$$

将式 (6) 写成向量形式为:

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

其中

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H}{\partial \delta} \\ \frac{\partial H}{\partial \omega_r} \\ \frac{\partial H}{\partial E'_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P_m + aE'_q \sin\delta \\ M(\omega - \omega_0) \\ a \cos\delta + \frac{ab}{c} E'_q \end{bmatrix} \quad (7)$$

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

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

$$g(x) = [0 \quad 0 \quad 1/T'_{d0}]^T$$

所以能量函数为

$$H(\delta, \omega_r, E'_q) =$$

$$\frac{1}{2} M x_2^2 - P_m x_1 - a E'_q \cos x_1 + \frac{ab}{2c} x_3^2 \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \begin{bmatrix} a E'_q \cos\delta & 0 & a \sin\delta \\ 0 & M & 0 \\ -a \sin\delta & 0 & ab/c \end{bmatrix}$$

当满足条件

$$\begin{cases} aE'_q \cos\delta > 0 \\ \frac{b}{c}(a^2E'_q \cos\delta) + a^2 \sin^2\delta > 0 \end{cases}$$

时,矩阵  $\nabla^2 H(\delta, \omega, E'_q)$  为正定矩阵. 所以,在稳态平衡点  $(\delta_s, 0, E'_q)$  的邻域

$$N = \left\{ (\delta, \omega, E'_q) \mid \frac{b}{c}(a^2E'_q \cos\delta) + a^2 \sin^2\delta > 0 \right\}$$

内,  $\nabla^2 H(\delta, \omega, E'_q)$  是正定的,函数  $H(\delta, \omega, E'_q)$  有极小值. 则系统的控制策略为

$$\begin{aligned} \mathbf{u} = & -Kg^T(x) \frac{\partial H(x)}{\partial x} = \\ & -\frac{K}{T'_{d0}}(a \cos\delta + \frac{a_1 b}{c} E'_q) \end{aligned} \quad (9)$$

### 3 数字仿真分析

为了验证以上控制规律的正确性及有效性,用图1所示具有 STATCOM 的单机无穷大系统进行动态仿真.

发电机及单机无穷大系统参数设置为:  $D = 1, H = 7.6, x_d = 0.825, x'_d = 0.14, X_T = 0.1, X_{L1} = 0.56, X_{L2} = 0.24, T'_{d0} = 10, V_\infty = 1, P_m = 0.9, k_1 = 0.1, k_2 = 0.05, f_0 = 50 \text{ Hz}$ .

仿真及试验条件如下:

- 1) 系统不安装 STATCOM;
- 2) 系统安装 STATCOM 并用常规 PID 控制;
- 3) 系统安装 STATCOM 并用非线性优化控制.

故障设置为  $t = 0.2 \text{ s}$  时在长距离中点发生三相短路故障,  $t = 0.25 \text{ s}$  时故障解除.

记录 STATCOM 在接入点电压变化的动态特性曲线如图2所示,发电机转子角特性曲线如图3所示. 从图2,图3可以看出,如果不安装 STATCOM,

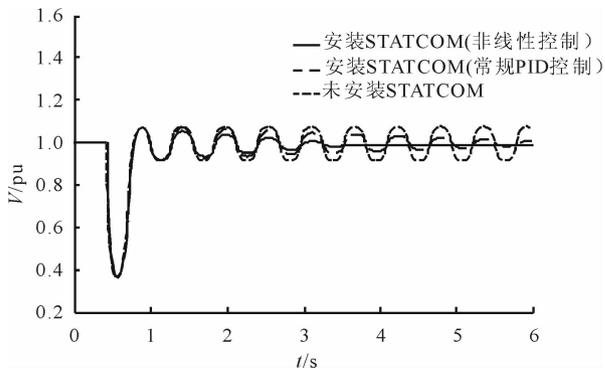


图2 STATCOM 接入点电压仿真曲线

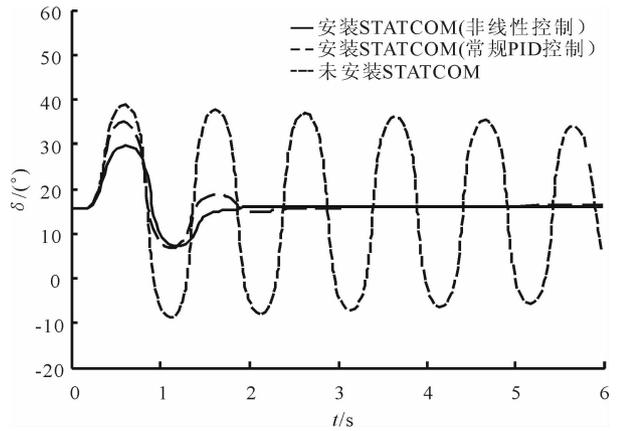


图3 发电机转子角特性曲线

系统发生严重振荡,长时间无法平息,而在安装了 STATCOM 之后,在2种控制方式下,系统都能很快地平息振荡,恢复稳定;在非线形控制下,系统的动态性能比PID控制要好. 仿真结果表明,所设计的控制器在故障发生后迅速保持系统稳定方面有很好的控制作用.

### 4 结论

本文利用 Hamilton 能量理论所具有的动态系统非线性控制特性,建立了单机无穷大系统下的含 STATCOM 的非线性控制系统模型,设计并验证了基于 Hamilton 能量理论的 STATCOM 的非线性控制器,在设计发电机励磁和 STATCOM 控制器过程中完全保留了原动态系统的非线性特性,且没有用到任何线性化方法. 仿真结果表明,在线路发生三相短路故障时,利用 Hamilton 能量理论所设计的非线性控制器对无功进行控制,能够快速恢复系统的动态稳定性,与传统的 PID 控制方法相比,该控制器能够更有效地提高电力系统的稳定性.

### 参考文献:

[1] Ram A. FACTS system studies[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(12):17.

[2] Padiyar K R, Prabhu N. Design and performance evaluation of subsynchronous damping controller with STATCOM [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3):1398.

[3] 许湘莲, 邹云屏, 丁凯. 基于相移级联多电平逆变器的 SVG 研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(6):59.

[4] 刘燕, 康积涛, 李晨霞, 等. 含有 STATCOM 的电力系统次同步谐振研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(5):38.

效提取出各阶次谐波信号,且基于小波变换的电能计量方法精确度较高,适合非平稳谐波的电能计量.

## 5 结论

本文利用小波分析对信号多分辨率分析处理的特性,提出了基于 Mallat 算法的小波变换方法.通过仿真验证,小波多分辨率分析方法能够有效地提取出谐波信号中各阶次谐波,小波重构则可以实现各频带内电力谐波参数的精确测量,也可以跟踪观测各频带内的谐波变化,同时结合谐波功率检测方法和电能计量原理,实现谐波电能准确、高效的计量.

### 参考文献:

[1] 潘绍明,罗功坤,劳有兰.基于快速傅里叶变换的电力

谐波分析和程序实现[J].广西工学院学报,2012(1):10.

- [2] 樊启斌.小波分析[M].武汉:武汉大学出版社,2008.
- [3] 谷文静,金涛.基于小波变换的电力系统谐波分析研究[J].电气技术,2012(8):36.
- [4] 伍超.基于小波变换的谐波检测方法研究[J].黑龙江科技信息,2010(10):24.
- [5] 张斌,孙静.基于 Mallat 算法和快速傅里叶变换的电能质量分析方法[J].电网技术,2007,31(19):35.
- [6] 李弼程,罗建书.小波分析及其应用[M].北京:电子工业出版社,2003.
- [7] 刘文松,流韶华,王芸波.谐波电能计量技术[J].中国电力教育,2010(35):255.
- [8] 葛哲飞,沙威.小波分析理论与 Matlab R2007 实现[M].北京:电子工业出版社,2007.

(上接第 78 页)

- [5] Pablo G G, Aurelio G C. Control system for a PWM based STATCOM [J]. IEEE Trans on Power, 2000, 15(4):1252.
- [6] Eacobar G, Schaft A J van der, Ortega R. A Hamiltonian viewpoint in the modeling of switching power converters [J]. Automatic, 1999, 35(3):445.
- [7] Xi Z, Cheng D. Passivity-based stability and control of the Hamiltonian control systems with dissipation and its applications to power system[J]. International Journal of Con-

trol, 2000, 73(18):1686.

- [8] 马进,席在荣.基于 Hamilton 能量理论的发电机汽门与励磁非线性稳定控制器的设计[J].中国电机工程学报,2002,22(5):88.
- [9] 陆冬良,张秀彬.基于 Hamilton 能量整形的多机电力系统励磁控制[J].电力系统保护与控制,2011,39(5):45.
- [10] 石坊,王杰.基于 Hamilton 能量函数的发电机励磁与 TCSC 协调控制[J].电力系统保护与控制,2012,40(15):24.