

Nonlinear Coordinate Control of STATCOM with Excitation System

WU Bei¹, CHEN Min-jiang²

1. FuZhou Electricity bureau, FuZhou, China; 2. FuJian Power maintenance company, FuZhou, China
1. babylink@126.com, 2.chenminjiang@sjtu.edu.cn

Abstract: A new nonlinear controller for STATCOM with power system excitation system is designed based on generalized Hamiltonian energy function, and the nonlinear property of the dynamic system is well preserved and utilized. Generalized Hamiltonian system theory and Hamiltonian energy function are introduced in detail, then a nonlinear mathematic model of STATCOM and its Hamiltonian realization is presented for single machine infinite system with excitation system. Simulation results verify the effectiveness of the controller.

Keywords: STATCOM; excitation; generalized Hamilton theory; coordinate control

STATCOM 与励磁系统非线性协调控制设计

吴蓓¹, 陈闽江²

1. 福州电业局, 福州, 中国, 350004; 2. 福建省电力检修公司, 福州, 中国, 350001

1. babylink@126.com, 2.chenminjiang@sjtu.edu.cn

【摘要】本文运用广义 Hamilton 能量系统理论, 设计了 STATCOM 和发电机励磁系统之间的协调控制, 详细分析 STATCOM 的一阶延时可控无功电流源模型, 建立含 STATCOM 的单机无穷大动态系统模型, 进一步推导得到了 I_q 和 E_f 的控制规律, 并对包含几种方式的运行状态进行了暂态稳定计算和比较, 验证了所设计的协调控制律的有效性。

【关键词】 STATCOM; 励磁系统; 广义 Hamilton 理论; 协调控制

1 引言

FACTS 技术的出现给电力系统带来了新的控制技术和应用手段。不断推出的 FACTS 装置在很大程度上为电力系统的安全稳定运行发挥出日益重要的作用, 特别在电压稳定和功角稳定方面。STATCOM 作为 FACTS 家族中的重要成员之一, 在电压快速调节、提高系统暂态稳定和阻尼系统功率振荡等方面发挥着越来越重要的作用。STATCOM 具有调节范围宽、体积小、反应迅速等优点, 可有效地提高电力系统的传输容量并增加电力系统的静态和暂态稳定性, 其重要作用是调节交流电网的无功, 也就是所谓的无功补偿。由于 STATCOM 采用先进的电力电子开关器件, 能够快速调节交流电网的无功, 具有反应快速和平滑的调节特性。目前我国电网正处于跨大区联网以及大型城市电网的快速发展阶段, STATCOM 可以对系统暂态电压稳定性的提高起到很大作用。

并联动态补偿技术已经成为提高超高压远距离线路输电能量、暂态稳定能力以及系统电压水平的关键技术, 在国内外也有了相应的示范工程。由于电力系统本身的规模庞大和控制复杂, FACTS 的控制策略一直是关注的热点。通常设计 FACTS 控制器时只考虑单一元件在系统中的作用, 并没有考虑若干 FACTS 元件或者与系统其他控制手段间的相互作用和影响。考虑系统发电机励磁和 STATCOM 之间的协调控制, 是一个很有研究价值的课题。

发电机励磁控制一直在电力系统稳定中发挥着重要的作用, 将 FACTS 元件与发电机励磁统一考虑也有相应文章涉足。文献[1]提出了发电机励磁与 FACTS 分散协调控制策略, 将这种方法应用于可控阻抗的器件。文献[2]提出了 ASVG 的非线性控制器设计, 针对 ASVG 面临的非线性、多目标控制问题, 应用直接反馈线性化、

内模控制和最优控制理论, 并利用合成电势矢量法, 设计了可以同时提高系统阻尼与电压控制精度的 ASVG 非线性控制器, 但是在控制设计过程中出现了微分代数模型, 给控制器的设计带来了很大的困难。文献[3]在文献[1]的基础上对原有的微分代数模型进行了深入研究和改进, 避免出现微分代数模型, 采用直接反馈线性化、零动态设计和最优控制方法, 设计了 STATCOM 无功电流与发电机励磁非线性控制器, 首先要对原非线性系统进行精确线性化, 然后针对线性化后的系统进行控制器设计。

Hamilton 系统是非线性科学研究中的重要领域之一, 涉及的领域相当广泛。目前, Hamilton 系统控制理论也引入电力系统的非线性控制领域。文[4]从能量的观点出发, 利用 Hamilton 能量系统理论, 设计了发电机汽门与励磁的非线性稳定控制器, 并用单机无穷大系统进行仿真验证。文[5]研究了一般非线性系统的 hamilton 实现问题, 并将所得结果应用与准 Lyapunov 函数的构造。文[6]提出了将非线性微分-代数系统表示为广义耗散 Hamilton 系统的实现方法, 并设计了结构保持多机电力系统的非线性励磁控制器。文[7]给出了一种双机系统的局部 Hmilton 实现方法, 同时还给出了基于能量的 Lyapunov 函数。

运用 STATCOM 的可控无功电流源模型, 利用 Hamilton 系统理论, 设计了 STATCOM 和发电机励磁的协调控制, 得到了 I_q 和 E_f 的控制规律, 并利用一个简单的单机无穷大系统对包含几种方式的运行状态进行了暂态稳定计算和比较, 验证了所设计的协调控制律的有效性。

2 STATCOM 与励磁系统的协调设计

2.1 STATCOM 建模

STATCOM 是一种电压型并联 FACTS 装置，将可控的无功功率注入系统。STATCOM 的系统图如图 2-4 所示，主要由一个并联电容，电压型逆变器（VSC），通过变压器联入系统。STATCOM 主要是由变流装置来实现产生无功功率目的的，即由系统通过联络变压器和变流器整流后向电容器充电，同时在电容器上的直流电压通过变流器逆变成三相交流。改变变流器中的电力电子器件阀门上的脉冲的同步时间，就可以控制逆变后的输出电压与系统电压间的相角差。

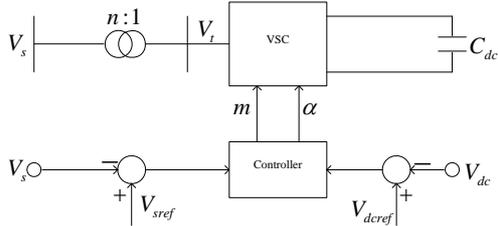


Figure 1. Diagram of STATCOM
图 1 STATCOM 系统图

STATCOM 装置原理图如图 1 中所示，它对电网电压作用实际上通过调整其对电网的输出电流的性质来决定的。电容是用来保持直流电源，这样通过改变 VSC 的输出电压幅值和相角，就可以控制 STATCOM 所吸收的无功特性就可以得到控制。正常工作时将 STATCOM 装置并联在电网上，通过调节电力半导体的开断，从而改变交流测与电网同频率的输出电压，使该电路吸收或发出所需要的无功功率，从而实现无功补偿的目的。

忽略有关的有功损耗，在本章中，STATCOM 采用一阶延时可控无功电流源模型，即装置对电网的改变直接来源于一个可控的无功电流，忽略其内部构造，并假设输出电流与接入点的电压的频率一致，其中当前 dq 轴坐标系定义为：d 轴始终与接入点电压向量同向，q 轴超前 90 度，从而保证装置的输出电流只含 q 轴分量，如图 2 中所示。

2.2 动态系统模型

考虑安装有 STATCOM 的单机无穷大系统，如图 2 中所示。该系统在传输线中间装有 STATCOM，在以下的设计中，发电机的励磁电压 E_f 作为动态

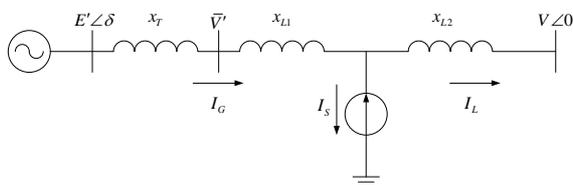


Figure 2. Single machine infinite bus system with STATCOM
图 2. 具有 STATCOM 的单机无穷大系统

系统的输入变量，不计调速器的作用，即原动机的输入功率 P^m 为常数，发电机采用三阶经典模型。

该系统的动态方程如下表示：

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_0 \quad (1)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} [\omega_0(P^m - P^e) - D(\omega - \omega_0)] \quad (2)$$

$$\dot{E}'_q = -\frac{1}{T_{d0}} [E'_q + I_d(x_d - x'_d)] + \frac{1}{T_{d0}} E_f \quad (3)$$

式中 P^m 为常数； $P^e = [E_q + (x_q - x'_d)I_d]I_q$

$$\text{由图 2 可以得到： } I_G = I_S + I_L \quad (4)$$

$$E' \angle \delta = V + jx_{L2}I_L + j(x_{L1} + x_T)I_G \quad (5)$$

$$\text{同时 } E' \angle \delta = E_d + jE_q = x_q I_q + j(E'_q - x'_d I_d) \quad (6)$$

$$\text{由此可以得到： } I_d = \frac{E'_q - V \cos \delta}{x'_d + x_\Sigma} \quad (7)$$

$$\text{式中 } x_\Sigma = x_{L1} + x_{L2} + x_T \quad (8)$$

将式(8)代入式(3)中可得

$$\dot{E}'_q = -\frac{1}{T_{d0}} \left[E'_q + \frac{(x_d - x'_d)}{x'_d + x_\Sigma} (E'_q - V \cos \delta) \right] + \frac{1}{T_{d0}} E_f \quad (9)$$

$$\text{进一步推导可得： } P^e = \frac{E'_q V \sin \delta}{X_1 + X_2} + \frac{X_1 X_2 E'_q V \sin \delta}{(X_1 + X_2)G} I_s \quad (10)$$

$$\text{式中 } X_1 = x_{L1} + x_T + x'_d \quad (11)$$

$$X_2 = x_{L2} \quad (12)$$

$$G = [(X_2 E'_q)^2 + (X_1 V)^2 + 2X_1 X_2 E'_q V \cos \delta]^{-\frac{1}{2}} \quad (13)$$

2.3 广义 HAMILTON

对于一个非线性动态系统如下式所示：

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + G(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (14)$$

式中 $x \in \mathbb{R}^n$ 为状态向量；

$u \in \mathbb{R}^m$ 和 $y \in \mathbb{R}^p$ 为系统的控制变量和输出变量；

$f(x): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, $\sigma: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$; $G: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times m}$ 为光滑向量场。

若存在函数 $H(X)$ ，使得系统(14)可以表示成为：

$$\begin{cases} \dot{X} = T(X)\nabla H + G(x)u \\ y = G^T(x)\nabla H \end{cases} \quad (15)$$

式中， $T(X)$ 为结构矩阵；

函数 H 为系统 (14) 的一个 Hamilton 函数。其中 ∇H 为函数 $H(x)$ 的梯度，则称非线性动态系统(15) 为广义受控 Hamilton 系统，

此时，对于系统(15)，如果结构矩阵 $T(x)$ 可以被分解成为 $T(x)=J(x)-R(x)$ ，式中 $J(x)$ 为反对称矩阵， $R(x) \geq 0$ 为对称矩阵，即：

$$\dot{X} = (J(x) - R(x))\nabla H + G(x)u \quad (16)$$

若非线性微分代数系统(14)具有耗散 Hamilton 实现 (16)，则存在控制策略

$$u = -MG^T \nabla H(X) \quad (17)$$

式中 M 为正定矩阵，使得系统(15)在平衡点 X^s 处渐进稳定。

由(17)的控制策略可得：

$$\begin{aligned} \dot{H}(X) &= \nabla^T H \cdot \dot{X} = \nabla^T H \{ (J(x) - R(x))\nabla H + G(x)u \} \\ &= -\nabla^T H \cdot R \cdot \nabla H - [G^T \nabla H(X)]^T \cdot M \cdot [G^T \nabla H(X)] \end{aligned} \quad (18)$$

由于 $R \geq 0, M \geq 0$, 有 $\dot{H}(X) \leq 0$, 当且仅当 $X = X^s$ 时有 $\dot{H}(X) = 0$, 根据 Lyapunov 函数的定义可知函数 H 是闭环反馈系统的一个 Lyapunov 函数, 且在控制律 u 的作用下, 系统在平衡点 X^s 处渐进稳定。

2.4 STATOM 与励磁系统协调设计

考虑励磁与 STATCOM 的协调控制, 系统动态模型是三阶非线性微分方程组, 采用基于 Hamilton 能量函数理论的控制策略来镇定系统。按照前面的方法, 根据广义 Hamilton 能量函数理论构造上述动态非线性系统的励磁与 STATCOM 协调的稳定控制策略。

令 $X = [\delta \quad \omega \quad E_q']^T$ 为新的状态变量, 则(1)到式(3)可以表示为:

$$\dot{X} = \begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{1}{M} \left[\omega_0 \left(P^m - \frac{E_q' V \sin \delta}{X_1 + X_2} \right) - D(\omega - \omega_0) \right] \\ \dot{E}_q' = -\frac{1}{T_{d0}} \left[E_q' + \frac{(x_d - x_d')}{x_d + x_{\Sigma}} (E_q' - V \cos \delta) \right] \\ \quad + \frac{1}{T_{d0}} E_f \end{cases} \quad (19)$$

令 $K = \frac{1}{(x_d - x_d')} E_q' + \frac{1}{x_d + x_{\Sigma}} (E_q' - V \cos \delta)$

上式可以写成:

$$\dot{X} = \begin{cases} \dot{\delta} = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{1}{M} \left[\omega_0 \left(P^m - \frac{E_q' V \sin \delta}{X_1 + X_2} \right) - D(\omega - \omega_0) \right] \\ \dot{E}_q' = \frac{x_d - x_d'}{T_{d0}} K + \frac{1}{T_{d0}} E_f \end{cases} \quad (20)$$

则计及 STATCOM 的系统动态可以表示成为

$$\dot{X} = F(X) + Gu = \begin{bmatrix} \omega - \omega_0 \\ \frac{1}{M} \left[\omega_0 \left(P^m - \frac{E_q' V \sin \delta}{X_1 + X_2} \right) - D(\omega - \omega_0) \right] \\ \frac{x_d - x_d'}{T_{d0}} K \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{\omega_0}{M} \frac{X_1 X_2 E_q' V \sin \delta}{(X_1 + X_2) G} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{d0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ E_f \end{bmatrix} \quad (21)$$

假设系统 (21) 具有一个稳定平衡点 $X^s = [\delta^s \quad \omega_0 \quad E_q'^s]^T$ 。考虑如下函数:

$$H(X) = \frac{1}{2} M (\omega - \omega_0)^2 - P^m (\delta - \delta^s) - \frac{E_q' V}{X_1 + X_2} (\cos \delta - \cos \delta^s) + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{(x_d - x_d')} + \frac{1}{x_d + x_{\Sigma}} \right] (E_q'^2 - E_q'^{s2}) \quad (22)$$

$$\text{上式的梯度为: } \nabla H(X) = \begin{bmatrix} -P^m + \frac{E_q' V}{X_1 + X_2} \sin \delta \\ \omega - \omega_0 \\ -K \end{bmatrix} \quad (23)$$

则(21)可以重写成为

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & \frac{D}{M} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{x_d - x_d'}{T_{d0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{E_q' V}{X_1 + X_2} \sin \delta - P^m \\ \omega - \omega_0 \\ -K \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{\omega_0}{M} \frac{X_1 X_2 E_q' V \sin \delta}{(X_1 + X_2) G} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{d0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ E_f \end{bmatrix} = (J - R) \nabla H(X) + Gu$$

$$\text{式中 } J(X) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad R(X) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D}{M} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{x_d - x_d'}{T_{d0}} \end{bmatrix}$$

则式 (21) 具有广义 Hamilton 实现, 存在控制策略:

$$u = -MG^T \nabla H(X)$$

$$= - \begin{bmatrix} w_1 & 0 \\ 0 & w_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \frac{\omega_0}{M} \frac{X_1 X_2 E_q' V \sin \delta}{(X_1 + X_2) G} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{d0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -P^m + \frac{E_q' V}{X_1 + X_2} \sin \delta \\ \omega - \omega_0 \\ -K \end{bmatrix} \quad (25)$$

则系统控制律为:

$$\begin{bmatrix} I_s \\ E_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -w_1 \frac{\omega_0}{M} \frac{X_1 X_2 E_q' V \sin \delta}{(X_1 + X_2) G} (\omega - \omega_0) \\ w_2 \frac{1}{T_{d0}} K \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中, w_1 和 w_2 为正常数。

3 算例仿真

为验证上述控制规律,对图3具有非线性负荷的单机无穷大系统进行仿真分析,STATCOM安装在线路中间。系统参数如下:

$x_d = 1.863$, $x'_d = 0.22$, $H = 6.7$, $D = 1$, $T'_d = 6.95s$, $x_{L1} = x_{L2} = 0.2426$, $x_T = 0.127$, $P^m = 0.9$, $V = 1$ 。控制律的参数取为: $w_1 = w_2 = 1$ 。

系统中负荷节点的有功和无功功率都是该节点的非线性电压函数,即:

$$P_L = P_{L0} \left(a_0 + a_1 \frac{V}{V_0} + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right) \quad (27)$$

$$Q_L = Q_{L0} \left(b_0 + b_1 \frac{V}{V_0} + b_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \right) \quad (28)$$

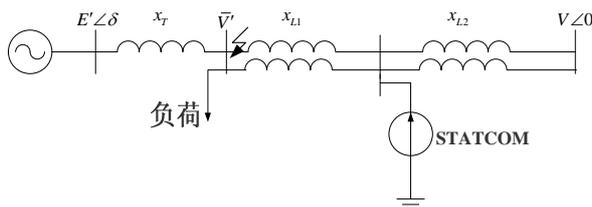


Figure 3. Single machine infinite bus system with STATCOM and a nonlinear load

图3. 具有一个非线性负荷和 STATCOM 的单机无穷大系统

式中:

a_2 到 a_0 为有功负荷的各部分比例; b_2 到 b_0 为无功负荷的各部分比例; P_{L0} 和 Q_{L0} 分别是额定有功和额定无功; V 是节点电压水平; P_L 和 Q_L 分别是在电压水平 V 的负荷有功和无功。

为验证其有效性,分别对下列3种状况进行暂态仿真:

(I) 励磁和 STATCOM 单独控制; (II) 只有励磁系统作用; (III) 考虑励磁和 STATCOM 的协调控制。

系统暂态过程如下:假定故障为瞬时性三相短路,发生地点如图中所示。考虑故障在 0.1s 开始,0.25s 切除故障线路,1s 时恢复故障线路,图4显示了 STATCOM 安装处电压的波动情况。

由图4所示,不难看出,在 STATCOM 的调节作用下,故障后电压得到明显提升,有利于系统的运行。当励磁和 STATCOM 的协调作用时,系统电压变化最小,从而验证了所提控制器的有效性。

4 结论

本文运用 STATCOM 的一阶可控无功电流源模型,利用 Hamilton 系统理论,设计了 STATCOM 和发电机励磁的协调控制,得到了 I_s 和 E_f 的控制规律,并利用一个简单的单机无穷大系统对包含几种方式的运行状态进行了暂态稳定计算和比较,验证了所设计的协调控制律的有效性。

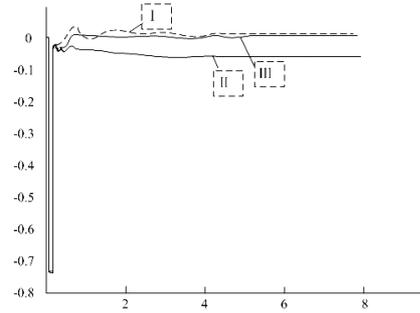


Figure 4. Curve of voltage at STATCOM-bus
图4 STATCOM 安装点电压偏差曲线

References (参考文献)

- [1] CHEN H, ADERSSON G, VERSATILE A, Versatile Approach for the control of FACTS equipment in multi-machine power system[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 1995, 17(3), P215-221.
- [2] XIE Xiaorong, CUI Wenjin, TANG Yiliang, and etc. , Coordinated control of STATCOM and generator excitation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 3(10), P19-22.
谢小荣, 崔文进, 唐义良等, STATCOM 与发电机励磁的协调控制[J], *电力系统自动化*, 2001, 3(10), P19-22.
- [3] GU Lihong, WANG Jie, Design of non-linear controllers for STATCOM and generator excitation [J]. *East China Electric Power*. 2006, 34(9),P1-5.
顾丽鸿, 王杰, STATCOM 与发电机励磁非线性控制器设计[J]. *华东电力*, 2006, 34(9),P1-5.
- [4] MA Jin, XI Zairong, MEI Shengwei, and etc., Nonlinear stabilizing controller design for the steam-valving and excitation system based on Hamiltonian energy theory [J]. *Proceedings of the CSEE*. 2002, 22(5) ,P88-93.
马进, 席在荣, 梅生伟, 等, 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) ,P88-93.
- [5] WANG Yuzhen, CHENG Daizhan, Li Chunwen, Ge You, Dissipative Hamiltonian Realization and Energy-based L2-Disturbance Attenuation Control of Multmachine Power Systems. *IEEE Trans. On Automatic Control*, 2003, 48(8), P1428-1433.
- [6] HAO Jin, WANG Jie, CHEN Chen, SHI Libao, Nonlinear excitation control of multi-machine power system with structure preserving models based on Hamiltonian system theory [J]. *Proceedings of the CSEE*. 2005, 25(18) , P6-12.
郝晋, 王杰, 陈陈, 石立宝. 基于 Hamilton 系统理论的结构保持多机电力系统非线性励磁控制[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(18) , P6-12.
- [7] CHEN Daizhan, XI Zairong, HONG Yiquang, Qin Huashu, Energy-based stabilization of forced Hamiltonian systems and its application to power systems. *Control Theory and Applications*, 2000, 17(6), P798-802.