

# 发电机励磁及 SVC 非线性最优协调控制

何振宇 李华强

(四川大学电气信息学院智能电网四川省重点实验室 四川 成都 610065)

**摘要:**发电机励磁和静止无功补偿器(static var compensator, SVC)对远距离输电的稳定性有很大影响。为了提高系统在大扰动情况下的暂态稳定性,提出一种发电机励磁系统与 SVC 协调非线性最优控制方法。通过建立发电机励磁与 SVC 系统的综合模型,将微分几何反馈线性化理论与线性最优控制理论相结合,设计了发电机励磁与 SVC 系统的非线性最优协调控制规律。控制信号实现了本地化,避免了远距离的信号传输。仿真结果证明,该控制方法能同时改善系统的功角稳定性和电压稳定性。

**关键词:**励磁系统; SVC; 非线性控制; 微分几何; 反馈线性化; 电压稳定

**Abstract:** The influence of generator excitation system and static var compensator (SVC) on the stability of long-distance transmission system is great. A nonlinear coordinated control of SVC and generator excitation is presented to improve the transient stability of power system in the presence of large disturbance. Firstly, a model including SVC and generator excitation is developed. Then, based on the differential geometric feedback linearization method of nonlinear system and the optimal control theory of linear system, a rule of optimal nonlinear coordinated control for SVC and generator excitation is designed. The control signal can realize the localization and avoid the remote signal transmission. Simulation results show that, by use of the proposed control strategy, the stability of power angle and voltage can be improved.

**Key words:** excitation system; static var compensator (SVC); nonlinear control; differential geometry; feedback linearization; voltage stability

中图分类号: TM301 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2012)02-0085-06

## 0 引言

电力系统的安全稳定是电力系统最重要的问题<sup>[1]</sup>。随着电网规模的不断扩大,超高压、远距离输电线路日益增多,使得电力系统的稳定控制变得愈加复杂<sup>[2]</sup>。系统的稳定性包括功角稳定性和电压稳定性。运行实践和理论表明,在电力系统的重要枢纽点快速的提供动态电压支撑是解决电力系统安全稳定的一个重要途径<sup>[3-4]</sup>。如何在提高系统功角稳定性的同时,改善系统的电压稳定性,是一个值得考虑的问题。

发电机励磁系统对电力系统的动态行为有很大的影响,长期以来,人们对用发电机励磁的控制来提高电力系统稳定性有深入的研究<sup>[5-9]</sup>。其附加控制即 PSS 对于增加系统阻尼、改善系统功角稳定性具有重要作用,但 PSS 对于改善系统的电压稳定性作用不大,尤其对于一个远距离输电的系统。

柔性交流输电系统(flexible AC transmission system, FACTS)元件的出现为解决电力系统的稳定控制

问题提供了新的手段。FACTS 家族的许多控制器,如静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、可控串补(thyristor controlled series compensation, TCSC)以及静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)等已成为提高系统暂态稳定的有效措施<sup>[10]</sup>。其中, SVC 作为电力系统的动态电压支撑的重要手段,越来越广泛地应用于电力系统<sup>[11-13]</sup>。SVC 具有突出的控制快速性,因此,深入研究 SVC 控制在改善电力系统稳定性中的作用具有重要意义。

与此同时,考虑到电力系统是一个强非线性系统,常规的控制是根据某个运行点的线性化模型设计的,在大扰动的情况下可能无法发挥理想的控制效果。如何考虑电力系统的非线性特性,要求 SVC 与发电机励磁系统进行协调控制以提高电力系统稳定,这已成为电力系统控制工作者研究的一个热点问题。文献[14]用反馈线性化技术对 SVC 与发电机励磁协调非线性控制进行了研究。直接反馈线性化技术在处理系统的非线性问题时,没有给出函数方程求逆的一般过程,在处理多输入多输出的复杂系统时较为困难。

微分几何理论源自于 20 世纪 80 年代,近年来,近代微分几何理论与非线性控制系统相结合,形成了一门新的学科体系,即非线性系统几何理论。微分几何理论结合现代控制理论在电力系统控制技术中得到了很好的应用。被用于解决大型发电机的励磁控制、无功补偿的非线性控制等,得到了比较好的控制效果。

采用微分几何反馈线性化理论设计 SVC 控制器,并与发电机励磁系统进行协调控制,结合现代控制理论,设计了发电机励磁和 SVC 系统的最优控制规律,使得控制器可以同时满足发电机功角稳定和 SVC 接入点电压稳定两个目标。仿真结果证明了控制规律的有效性。

## 1 微分几何状态反馈线性化理论简述

考虑到文中的情况,针对一个双输入双输出的仿射非线性系统。其一般形式如下。

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = f(X) + g_1(X)u_1 + g_2(X)u_2 \\ y_1(t) = h_1(X) \\ y_2(t) = h_2(X) \end{cases} \quad (1)$$

其中  $X$  是  $n$  维状态向量;  $f(X)$  及  $g_1(X)$ 、 $g_2(X)$  均是  $n$  维向量场;  $u_1$ 、 $u_2$  是  $n$  维控制变量;  $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$  是输出变量;  $h_1(X)$ 、 $h_2(X)$  是  $X$  的标量函数。

根据微分几何理论,对于每一个输出量  $y_i$ ,有一个对应的关系度  $r_i$ ,则多变量系统的关系度  $r$  是一个集合。对于文中的系统,假定有  $r = r_1 + r_2 = n$ ,  $n$  是状态向量维数。若非线性系统 (1) 能被输入状态反馈线性化,则在一个邻域  $\Omega$  内存在一个微分同胚  $T$ ,做坐标变换,系统 (1) 变换成。

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dots \\ \dot{z}_{r_1-1} = z_{r_1} \\ \dot{z}_r = L_f^{r_1} h_1(X) + L_{g_1} L_f^{r_1-1} h_1(X) u_1 + L_{g_2} L_f^{r_1-1} h_1(X) u_2 \\ \dots \\ \dot{\varphi}_1 = \varphi_2 \\ \dots \\ \dot{\varphi}_{r_2-1} = \varphi_{r_2} \\ \dot{\varphi}_{r_2} = L_f^{r_2} h_2(X) + L_{g_1} L_f^{r_2-1} h_2(X) u_1 + L_{g_2} L_f^{r_2-1} h_2(X) u_2 \end{cases} \quad (2)$$

即可转化为以新坐标系表达的标准型。

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dots \\ \dot{z}_{r_1-1} = z_{r_1} \\ \dot{z}_r = a_1(Z) + b_{11}(Z)u_1 + b_{12}(Z)u_2 \\ \dots \\ \dot{\varphi}_1 = \varphi_2 \\ \dots \\ \dot{\varphi}_{r_2-1} = \varphi_{r_2} \\ \dot{\varphi}_{r_2} = a_2(Z) + b_{21}(Z)u_1 + b_{22}(Z)u_2 \end{cases} \quad (3)$$

其中  $Z = [z_1, \dots, z_{r_1}, \varphi_1, \dots, \varphi_{r_2}]^T$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} a_1(Z) \\ a_2(Z) \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} L_f^{r_1} h_1(X) \\ L_f^{r_2} h_2(X) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11}(Z) & b_{12}(Z) \\ b_{21}(Z) & b_{22}(Z) \end{bmatrix} \\ & = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{r_1-1} h_1(X) & L_{g_2} L_f^{r_1-1} h_1(X) \\ L_{g_1} L_f^{r_2-1} h_2(X) & L_{g_2} L_f^{r_2-1} h_2(X) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

在新坐标下,系统是一个线性系统,可以利用成熟的线性控制理论来设计控制器。

微分几何反馈线性化数学概念清晰,是一种精确的线性化方法,数学变换理论严格,经证明,经过微分几何线性化后的系统的能控性、能观性都不发生改变,是一种优秀的非线性控制理论。

## 2 系统数学模型

### 2.1 系统接线方式

考虑最典型的单机远距离与无穷大电网互联的系统如图 1 所示。

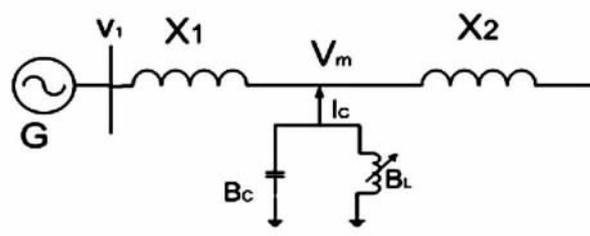


图 1 具有 SVC 的单机无穷大系统

### 2.2 发电机模型

对于单机无穷大系统,发电机模型可描述为

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega(t) - \omega_0 \\ \dot{\omega} = -\frac{D}{H}(\omega(t) - \omega_0) + \frac{\omega_0}{H}(P_m - P_e) \\ \dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} [E_f(t) - E_q(t)] \end{cases} \quad (4)$$

且有

$$E_q(t) = E'_q(t) + (X_d - X'_d) I_d(t) \\ = \frac{X_{d\Sigma}}{X'_{d\Sigma}} E'_q(t) - \frac{X_d - X'_d}{X'_{d\Sigma}} V_2 \cos\delta(t) \quad (5)$$

$$P_e(t) = \frac{E'_q(t)}{X'_{d\Sigma}} V_2 \sin\delta(t) \quad (6)$$

$$I_d(t) = \frac{E'_q(t) - V_2 \cos\delta(t)}{X'_{d\Sigma}} \quad (7)$$

$$E_f(t) = k_c u_f \quad (8)$$

$$E_q(t) = X_{ad} I_f(t) \quad (9)$$

式中  $I_d(t)$  是发电机直轴电流;  $I_f(t)$  是励磁电流;  $u_f$  是励磁电压;  $X_{ad}$  为定子绕组与励磁绕组的互感抗,  $X_{d\Sigma} = X_d + X_1$ ,  $X'_{d\Sigma} = X'_{d\Sigma} = X'_d + X_1$ ,  $X_1 = X'_d + X_1 + X_2 + (X'_d + X_1) \cdot X_2 \cdot B_{svc}$ ;  $X_d$  和  $X'_d$  分别是发电机的直轴电抗和暂态电抗;  $E'_q(t)$  为发电机交轴暂态电势;  $\delta$  为发电机相对无穷大母线的功角;  $B_{svc}$  是 SVC 的等值电纳。

### 2.3 SVC 模型

SVC 采用如图 2 所示的实用模型。

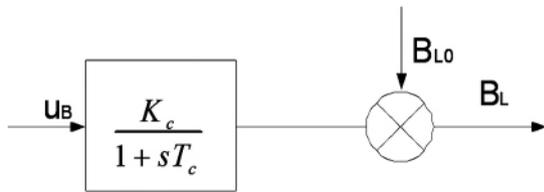


图2 SVC 模型

其动态数学模型为

$$\dot{B}_L = \frac{1}{T_c} [-B_L + B_{L0} + k_B \mu_B(t)] \quad (10)$$

式中  $T_c$  是 SVC 控制器的时间常数;  $B_L$  为 SVC 中电感支路电纳;  $B_{L0}$  是初始值;  $k_B$  是控制器增益;  $\mu_B$  为控制器输入。

为了简化设计,一般假定如下。

(1) 发电机采用三阶模型。

(2) 不考虑励磁系统的动态过程,即  $E_f = V_R$ ,  $E_f$  是励磁系统的输出电压(输入),  $V_R$  是励磁系统的控制电压(输入)。

(3) 发电机的机械功率在暂态过程中保持不变。

基于以上假设,单机无穷大系统结合 SVC 的数学模型,便得到带有 SVC 的系统模型,控制目标是要同时满足发电机功角稳定和 SVC 处电压稳定两个目标,因此选取功角偏差和电压偏差作为输出量。写成状态空间形式为

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = f(X) + g_1(X) \mu_1 + g_2(X) \mu_2 \\ y_1 = h_1(X) = \delta - \delta_0 \\ y_2 = h_2(X) = V_m - V_{m0} \end{cases} \quad (11)$$

$V_m$  为 SVC 接入点的等效电压;  $V_{m0}$  是其稳态值。又根据 SVC 电路特性有:  $V_m = \frac{I_c}{B_L}$ ,  $I_c$  是可调电感支路电流。

$$X = [\delta \ \omega \ E'_q \ B_L]^T, [\mu_1 \ \mu_2] = [\mu_f \ \mu_B]^T$$

$$f(X) = \begin{bmatrix} \omega(t) - \omega_0 \\ \frac{\omega_0}{H} (P_m - D \frac{\omega(t) - \omega_0}{\omega_0} - \frac{E'_q(t) V_2 \sin\delta(t)}{X'_{d\Sigma}}) \\ \frac{1}{T'_{d0}} (-\frac{X'_d}{X'_{d\Sigma}} E'_q(t) + \frac{X_d - X'_d}{X'_{d\Sigma}} V_2 \cos\delta(t)) \\ \frac{1}{T_c} (-B_L + B_{L0}) \end{bmatrix}$$

$$g_1(X) = [0 \ 0 \ \frac{1}{T'_{d0}} k_c \ 0]^T$$

$$g_2(X) = [0 \ 0 \ 0 \ \frac{1}{T_c} k_B]^T$$

### 3 基于微分几何反馈线性化的控制器设计

对于所提的仿射非线性系统,首先验证其是否能进行精确线性化,为此需求解其对两个输出  $y_1 = h_1(X)$ 、 $y_2 = h_2(X)$  的关系度  $r_1$ 、 $r_2$ 。对于  $y_1 = h_1(X)$  有

$$L_{g_1} h_1(X) = \frac{\partial h_1(X)}{\partial X} g_1(X) = 0 \quad (12)$$

$$L_{g_2} h_1(x) = \frac{\partial h_2(x)}{\partial X} g_1(X) = 0 \quad (13)$$

$$L_f h_1(x) = \frac{\partial h_1(x)}{\partial X} f(X) = \omega - \omega_0 \quad (14)$$

$$L_{g_1} L_f h_1(x) = \frac{\partial(L_f h_1(x))}{\partial X} g_1(X) = 0 \quad (15)$$

$$L_{g_2} L_f h_1(x) = \frac{\partial(L_f h_1(x))}{\partial X} g_2(X) = 0 \quad (16)$$

$$L_{g_1} L_f^2 h_1(x) = \frac{\partial(L_f^2 h_1(x))}{\partial X} g_1(X) = \frac{k_c E'_q V_2 \sin\delta}{T_c X'_{d\Sigma}} \neq 0 \quad (17)$$

由此可知  $r_1 = 3$ 。对于  $y_1 = h_2(X)$  有

$$L_{g_1} h_2(x) = \frac{\partial h_2(x)}{\partial X} g_1(X) = 0 \quad (18)$$

$$L_{g_2} h_2(x) = \frac{\partial h_2(x)}{\partial X} g_2(X) = -\frac{k_B I_c}{T_c B_L^2} \neq 0 \quad (19)$$

可知  $r_2 = 1$ 。则有  $r = r_1 + r_2 = n = 4$ 。满足系统被线性化的条件,因此,存在一个坐标变换使得系统被新坐标下线性化。

选择如下的坐标变换。

$$\begin{aligned} z_1 &= h_1(X) = \delta - \delta_0 \\ z_2 &= L_f h_1(X) = \omega(t) - \omega_0 \\ z_3 &= L_f^2 h_1(X) = \frac{\omega_0}{H} (P_m - \frac{D}{\omega_0} (\omega - \omega_0) - P_e) \quad (20) \\ z_4 &= h_2(X) = \frac{I_c}{B_L} - V_{m0} \end{aligned}$$

其雅各比矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\frac{\omega_0 C_2 \sin \delta}{HX'_{d\Sigma}} & 0 \\ -\frac{\omega_0 E'_q V_2 \cos \delta}{HX'_{d\Sigma}} \omega & -\frac{D}{H} & -\frac{\omega_0 V_2 \sin \delta}{HX'_{d\Sigma}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{I_c}{B_L^2} \end{bmatrix}$$

在系统运行范围内,矩阵的行列式值不为 0,由此可知该坐标变换是一组合格的坐标变换。对于新坐标下的系统有

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \dot{z}_3 = L_f^3 h_1(X) + L_{g_1} L_f^2 h_1(X) u_1 + L_{g_2} L_f^2 h_1(X) u_2 \\ \dot{z}_4 = L_f h_2(X) + L_{g_1} h_2(X) u_1 + L_{g_2} h_2(X) u_2 \end{cases} \quad (21)$$

令

$$\begin{aligned} \dot{z}_3 &= -\frac{\omega_0 E'_q V_2 \cos \delta}{HX'_{d\Sigma}} \omega (\omega - \omega_0) - \frac{D\omega_0}{H^2} (P_m - \\ & D \frac{D - \omega_0}{\omega_0} - P_e) + \frac{\omega_0 V_2 \sin \delta}{HX'_{d\Sigma} T'_{d0}} E_q - \frac{Dk_c}{HT'_{d0}} \mu_f = v_1 \\ \dot{z}_4 &= -\frac{I_c}{B_L^2 T_c} (-B_L + B_{L0}) - \frac{I_c}{B_L^2 T_c} k_B \mu_B = v_2 \end{aligned}$$

得到线性化方程

$$\dot{Z} = AZ + BV \quad (22)$$

其中  $Z = [z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4]^T$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} V = [v_1 \ v_2]$$

输出方程

$$y_1 = z_1 \quad (23)$$

$$y_2 = z_4 \quad (24)$$

求解  $u_1, u_2$  得

$$\begin{aligned} u_f &= -\frac{\omega_0 V_2 \sin \delta}{Dk_c} \omega (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{Hk_c} (P_m - D \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \\ & - P_e) + \frac{\omega_0 V_2 \sin \delta}{X'_{d\Sigma} Dk_c} E_q - \frac{\omega_0 H}{Dk_c} v_1 \quad (25) \end{aligned}$$

$$u_B = -\frac{1}{k_B} (-B_L + B_{L0}) - \frac{B_L^2 T_c}{I_c k_B} v_2 \quad (26)$$

根据线性二次最优控制理论,选取性能指标  $J =$

$\int_0^{\infty} (Z^T QZ + V^T R V) dt$  使得性能指标达到极值的状态反馈向量表示为

$V = -R^{-1} B^T PZ = -KZ$ , 其中,  $P$  是 Riccati 方程  $A^T P + PA - PBR^{-1} B^T P + Q = 0$  的对称正解。对于系统,选取合适的权矩阵,求得最优反馈增益系数为

$$K = \begin{bmatrix} 1 & 2.414 & 2.414 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

得到  $\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} z_1 + 2.414z_2 + 2.414z_3 \\ z_4 \end{bmatrix}$ ,代入式

(25)、(26) 即可得到完整的非线性控制规律。

$$\begin{aligned} u_f &= -\frac{\omega_0 V_2 \sin \delta}{Dk_c} \omega (\omega - \omega_0) + \frac{\omega_0 V_2 \sin \delta}{X'_{d\Sigma} Dk_c} E_q + \frac{\omega_0 H}{Dk_c} \\ & (\delta - \delta_0 + 2.414(\omega - \omega_0)) + 2.414 \\ & (\frac{\omega_0^2}{Dk_c} - \frac{\omega_0}{Hk_c}) (P_m - D \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} - P_e) \quad (27) \end{aligned}$$

$$u_B = -\frac{1}{k_B} (-B_L + B_{L0}) + \frac{B_L^2 T_c}{I_c k_B} (\frac{I_c}{B_L} - V_{m0}) \quad (28)$$

从控制规律可以看出,发电机励磁系统和 SVC 均实现了本地信号控制,因此所设计的控制器具有分散协调性,而无需要信号的通信,减少了由于信号延迟等引起的误差。

## 4 仿真分析

利用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 对图 1 所示的单机无穷大系统进行仿真。SVC 接在长距离输电线路的中点,系统参数如下。

$X_d = 1.8548, X'_d = 0.2568, X_1 = X_2 = 0.0343, H = 8 \text{ s}, T'_{d0} = 9.22 \text{ s}, T_c = 0.1 \text{ s}$ ,发电机容量 350 MW,功率因数 0.9,故障设置分为两种:(1) 1.0 s 时发电机出口三相接地短路,持续时间 0.1 s。(2) 1.5 s 时

线路中点发生三相接地短路,持续时间0.1 s。发电机功角曲线及 SVC 接入点电压曲线如图 5 所示。图 3、图 4 表示故障 1 的情况,图 5、图 2 表示故障 2 的情况。

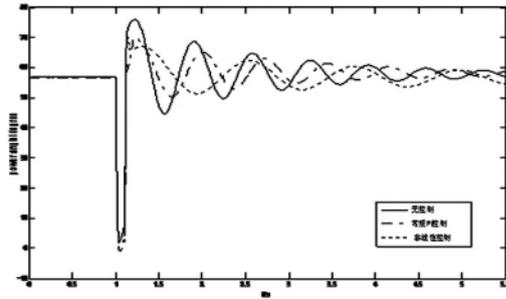


图 3 机端故障发电机功角

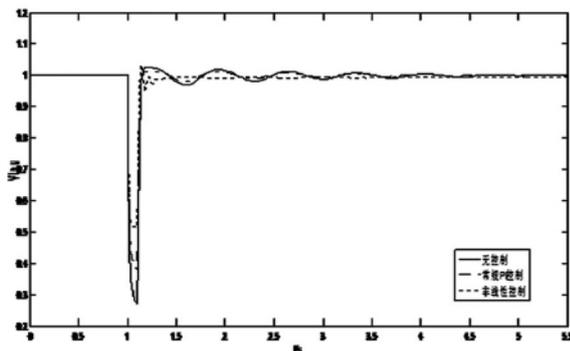


图 4 机端故障电压曲线

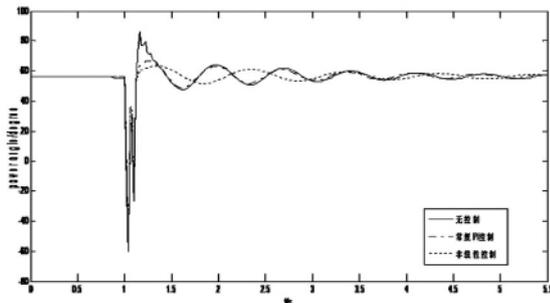


图 5 中点故障功角曲线

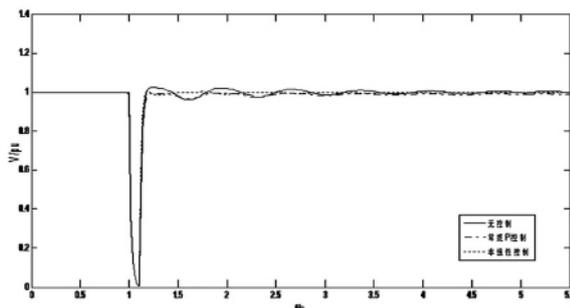


图 6 中点故障电压曲线

由图可知,系统加装控制器后,发电机功角振荡

和 SVC 接入点的电压波动都能很快平息,系统的暂态稳定性和电压稳定性都得以提高,较常规的 PI 控制器效果要好。

### 5 结 语

电力系统是一个强非线性系统,针对所提的单机无穷大系统,通过微分几何反馈线性化理论,结合最优控制方法,在保留系统的非线性特性的情况下,设计了一种发电机励磁系统和 SVC 非线性协调最优控制规律。仿真验证了控制规律能有效提高系统的功角稳定性和电压稳定性,提出的方法都能够保证系统的稳定性,且控制规律实现了本地信号控制。

利用非线性理论设计的控制器能明显地提高电力系统暂态稳定性和电压稳定性。微分几何反馈线性化的数学理论基础坚实,但也有无法克服的缺点,如:要求系统的数学模型精确,不具备对模型和参数不确定的鲁棒性,数学推导及控制规律非常复杂等。这都是以后研究将要注意的地方。

### 参考文献

[1] 柯宁,苏建设,陈陈. TCSC 与 SVC 用于提高输电系统暂态稳定性的仿真研究[J]. 电力系统自动化,2004,28(1):20-24.

[2] 兰洲,倪以信,等. 现代电力系统暂态稳定控制研究综述[J]. 电网技术,2005,29(15):40-50.

[3] 陈闽江,王杰,等. 含 STATCOM 多机系统的广义 Hamilton 非线性控制设计[J]. 高电压技术,2010,36(7):1833-1838.

[4] 廖民传,蔡广林,张勇军. 交直流混合系统受端电网暂态电压稳定分析[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(10):1-4.

[5] 张帆,徐政. 励磁系统及电力系统稳定器对发电机组次同步谐振阻尼特性的影响[J]. 电网技术,2006,30(18):14-18.

[6] 梅生伟,黎雄,卢强,等. 基于反馈线性化方法的励磁系统非线性  $H_{\infty}$  控制研究[J]. 电力系统及其自动化学报,1999,11(4):1-7.

[7] 刘辉,李啸骢,韦化. 基于目标全息反馈法的发电机非线性励磁控制设计[J]. 中国电机工程学报,2007,27(1):14-18.

[8] Lu Q, Sun Y, Xu Z, et al. Decentralized Nonlinear Optimal Excitation Control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1957-1962.

[9] 鲜艳霞,李兴源.提高暂态稳定性的 HVDC 与发电机励磁的非线性最优协调[J].继电器,2004,32(20):1-4.

[10] 王宝华,杨成梧.FACTS 稳定控制策略综述[J].电力自动化设备,2000,20(2):15-21.

[11] 杨波,刘天琪,李兴源,等.基于最优变目标的 HVDC 与 SVC 非线性综合协调控制[J].继电器,2006,34(17):29-33.

[12] 严伟佳,蒋平.抑制区域间低频振荡的 FACTS 阻尼控制[J].高电压技术,2007,33(1):189-192.

[13] D. Z. Fang, Xiondong Yang, T. S. Chung, et al. Adaptive Fuzzy - logic SVC Damping Controller Using Strategy of

Oscillation Energy Descent [J]. IEEE Transactions of Power System, 2004, 19(3): 1414-1421.

[14] 马幼捷. SVC 与发电机励磁协调非线性控制[J].电工技术学报,1998,13(4):1-4.

作者简介:

何振宇(1987)男,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定控制;

李华强(1965)男,教授,硕士生导师,从事电压稳定及无功优化控制问题研究。

(收稿日期:2011-12-07)

(上接第72页)

并没有严格按照负荷的变化成比例变化,空载时转矩为 0 p. u.,满载运行时转矩为 1.048 p. u.,其原因在于负荷增加时转速下降,空载时转速为额定值 1 p. u.,满载时转速为 0.957 p. u.,而  $P_e = T_e \omega$  ( $P_e$  为电磁功率,  $T_e$  为电磁转矩,  $\omega$  为转速),由于电磁转矩和机械转矩在稳定状态下平衡,故实际满载运行时,机械转矩会略高于 1 p. u.,但整个仿真过程中转速都维持在额定转速附近。

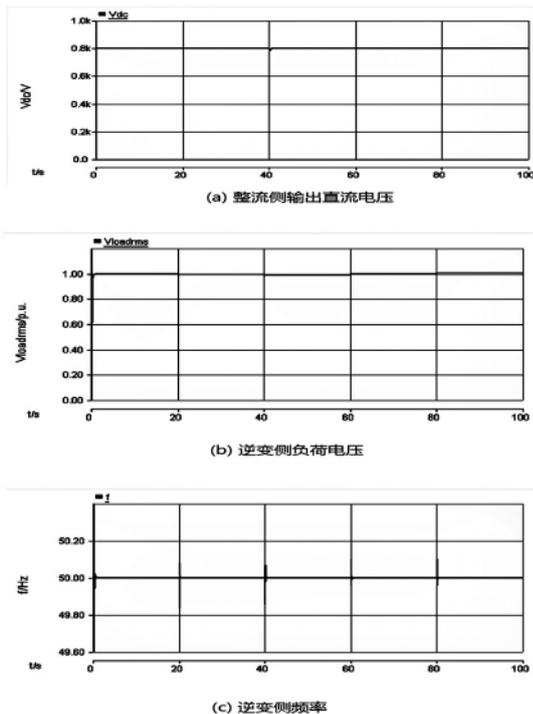


图9 整流侧和逆变侧的电压、频率

图9为微型燃气轮机发电系统整流侧和逆变侧的电压与频率,由于整流器采用双闭环恒压控制,其输出直流侧电压  $V_{dc}$  能保持在参考值 0.8 kV 附近;随着负荷的变化,逆变侧负荷电压  $V_{loadrms}$  能基本维持在 1 p. u. 左

右;频率  $f$  最高不超过 50.1 Hz,最低为 49.84 Hz,最后稳定在 50 Hz,变化范围为  $\pm 0.2$  Hz,从而保证了负荷对电能质量的要求。

### 5 结 语

根据微型燃气轮机的工作原理,把微型燃气轮机及其变流部分当作一个整体,建立了微型燃气轮机发电系统的完整数学模型。整流器采用双闭环恒压控制,维持了直流侧电压的恒定;逆变器采用 V/F 控制,保证了负荷侧电压与频率的稳定。利用 PSCAD/EMTDC 软件对微型燃气轮机动态特性进行仿真分析,验证了该模型的有效性。

### 参考文献

[1] 杨策,刘宏伟,李晓.微型燃气轮机技术[J].热能动力工程,2003,18(1):1-4.

[2] 王成山,马力,王守相.基于双 PWM 换流器的微型燃气轮机系统仿真[J].电力系统自动化,2008,32(1):56-60.

[3] 余涛,童家鹏.微型燃气轮机发电系统的建模与仿真[J].电力系统保护与控制,2009,37(3):27-31,45.

[4] 丁奇,严东超,曹启蒙.三相电压型 PWM 整流器控制系统设计方法的研究[J].电力系统保护与控制,2009,37(23):84-87,99.

[5] 陈江辉,谢运祥,陈兵.逆变电路的控制技术与策略[J].电气应用,2006,25(9):102-106.

作者简介:

邓浩(1986)男,硕士,研究方向为电力系统自动化和电能质量;

李春艳(1985)女,硕士,研究方向为电力系统自动化和电能质量。

(收稿日期:2011-12-21)