

基于反馈线性化的静止同步串联补偿器 变结构潮流控制研究

贺双双¹, 曹建军¹, 陈智迪²

(1. 武汉金中石化工程有限公司 湖北 武汉 430000; 2. 湖北能源集团 湖北 武汉 430000)

摘要: 静止同步串联补偿器 (static synchronous series compensator, SSSC) 是一种调节线路潮流和接入点电压的 FACTS 装置, 采用输入-输出反馈线性化处理 SSSC 含滤波电容方程的 5 阶非线性等效数学模型, 得到一个带约束条件的线性方程, 运用变结构控制理论设计了 SSSC 的变结构控制器。最后利用 Matlab/Simulink 仿真验证了所设计的控制器达到了 SSSC 的控制潮流的效果, 与 PI 控制相比, 其性能有一定的优越性。

关键词: 静止同步串联补偿器; 输入-输出线性化; 变结构控制; 抗干扰能力

Abstract: Static synchronous series compensator (SSSC) is a kind of FACTS devices to regulate line power flow and the voltage at access point. The fifth-order nonlinear mathematical model of SSSC containing filter capacitor equation is processed by input/output feedback linearization to acquire linear equations with the constraints, and then the variable structure controller of SSSC is designed using variable structure control theory. Finally, the simulation in Matlab/Simulink dynamic simulation platform verifies the designed controller can achieve the control effect for SSSC and has some advantages compared with PI control.

Key words: static synchronous series compensator (SSSC); input/output linearization; variable structure control; anti-jamming capability

中图分类号: TM74 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)04-0056-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.04.014

0 引言

静止同步串联补偿器 (static synchronous series compensator, SSSC) 是常见的第二代柔性交流输电装置, 它是通过串入一个可变电压来调节线路潮流和接入点电压^[1-3]。SSSC 常见的控制方式主要包括 PI (proportional integral) 控制、智能控制和非线性控制, 非线性控制方法是近年应用在 SSSC 中比较普遍的一种方法^[4-5]。文献 [6] 分别从定阻抗和定电压两种控制角度, 运用逆系统滑模控制分别对 SSSC 进行了控制设计, 这种设计方法本质上是 PI 和滑模混合控制, 增加了协调控制的难度。文献 [7] 利用直接反馈线性化方法处理 SSSC 的 3 阶动态模型, 未考虑 SSSC 中滤波电容的动态变化过程。文献 [8] 运用微分几何方法处理含 SSSC 的单机无穷大系统, 结合线性最优控制理论, 得到了 SSSC 的非线性最优控制策略。文献 [9] 建立了 SSSC 的多变量仿射非线性模型, 用精确反馈线性化方法设计了 SSSC 的非线性多输入多输出控制器。考虑了

SSSC 中的滤波电容影响和常规 $d-q$ 轴分解的耦合问题, 给出了 SSSC 在 $\alpha\beta$ 坐标系下的 5 阶非线性等效数学模型, 该数学模型更加贴近 SSSC 运行特点, 采用输入-输出反馈线性化处理得到 1 个含 2 个约束条件的线性方程, 运用变结构控制 (也称为滑模控制) 理论设计了 SSSC 的变结构控制器, 并分析了所设计的控制器抗干扰性能。最后利用 Matlab/Simulink 仿真验证了所设计的控制器与 PI 控制相比响应更快, 具有较好的鲁棒性。

1 SSSC 控制系统的反馈线性化

1.1 SSSC 反馈线性化判别

SSSC 的等效电路图如图 1 所示, 图中 R_2 、 L_2 、 C_e 分别为串联侧的滤波电感、等值电阻和滤波电容; C 为直流侧电容; U_{dc} 为电容电压; P 、 Q 分别是串联侧注入系统的有功功率和无功功率; u_{2a} 、 u_{2b} 、 u_{2c} 、 i_{2-abc} 为逆变器的输出三相电压和输出三相电流; u_{ac} 、 u_{cb} 、 u_{cc} 、 i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 为滤波电容侧的输出三相电压和输出三相电流; u_s 为始端电压; u_j 为末端电压^[10]。

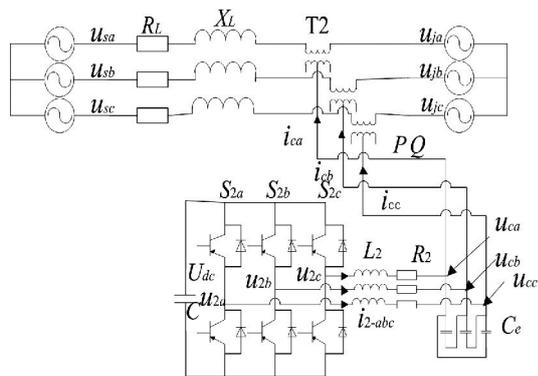


图 1 SSSC 的等效电路图

则 SSSC 在坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} L_2 \frac{di_{2\alpha}}{dt} = u_{2\alpha} - R_2 i_{2\alpha} - u_{ca} \\ L_2 \frac{di_{2\beta}}{dt} = u_{2\beta} - R_2 i_{2\beta} - u_{cb} \\ C_e \frac{du_{c\alpha}}{dt} = i_{2\alpha} - i_{c\alpha} \\ C_e \frac{du_{c\beta}}{dt} = i_{2\beta} - i_{c\beta} \\ CU_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = -\frac{3}{2}(u_{2\alpha} i_{2\alpha} + u_{2\beta} i_{2\beta}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_{2j} = s_{2j} U_{dc}$; $j = \alpha, \beta$; s_{2j} 为对应线路的开关信号函数。

将式 (1) 整理为式 (2) 所示的非线性系统标准形式^[11-12] 则有

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g_1(x) \mu \\ y = h(x) \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$$\begin{aligned} x &= [x_1 \quad x_{2,\alpha} \quad x_4 \quad x_5]^T \\ &= [i_{2\alpha} \quad i_{2\beta} \quad u_{c\alpha} \quad u_{c\beta} \quad U_{dc}]^T \\ \mu &= [s_{2\alpha} \quad s_{2\beta}]^T \\ y &= [y_1 \quad y_2]^T \end{aligned}$$

$$f(x, t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_2}(-R_2 x_1 - x_3) \\ \frac{1}{L_2}(-R_2 x_2 - x_4) \\ \frac{1}{C_e}(x_1 - i_{2c\alpha}) \\ \frac{1}{C_e}(x_2 - i_{2c\beta}) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$g(x, t) = \begin{bmatrix} x_5/L_2 & 0 \\ 0 & x_5/L_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -3x_1/2C & -3x_1/2C \end{bmatrix}$$

设输出 $y_1 = \frac{L_2}{2}(x_1^2 + x_2^2) + \frac{C}{3}x_5^2$, 则输出函数为

$$\begin{aligned} y &= [y_1 \quad y_2]^T = [h_1(x) \quad h_2(x)]^T \\ &= \left[\frac{L_2}{2}(x_1^2 + x_2^2) + \frac{C}{3}x_5^2 \quad x_2 \right]^T \end{aligned} \quad (3)$$

根据文献 [12] 系统关系度的定义 先求得:

$$\begin{cases} L_{g1} h_1(x) = \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_1} (x_5/L_2) - \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_5} (3x_1/2C) = 0 \\ L_{g2} h_1(x) = \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_2} (x_5/L_2) - \frac{\partial h_1(x)}{\partial x_5} (3x_2/2C) = 0 \\ L_{g1} L_f^1 h_1(x) = \frac{x_5}{L_2} (2R_2 x_1 + x_3) \neq 0 \\ L_{g2} L_f^1 h_1(x) = \frac{x_5}{L_2} (2R_2 x_2 + x_4) \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} L_{g1} h_2(x) = 0 \\ L_{g2} h_2(x) = \frac{\partial h_2(x)}{\partial x_2} (x_5/L_1) = \frac{x_5}{L_2} \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

得到系统 2 个输出函数对应的关系度分别为 $r = [r_1 \quad r_2] = [2 \quad 1] < n = 5$, 因此系统不满足状态反馈精确线性化条件, 使得 $y^{(n)} = v$, 但可以实现输入-输出线性化 $y^{(r)} = v$ 。

1.2 SSSC 输入-输出线性化

SSSC 是一个 5 输入-2 输出系统, 前面已经判断出系统只能进行输入-输出线性化处理, 因此选择坐标变换:

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x) \\ L_f h_1(x) \\ h_2(x) \\ \varphi_1(x) \\ \varphi_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L_2}{2}x_1^2 + x_2^2 + \frac{C}{3}x_5^2 \\ -R_2(x_1^2 + x_2^2) - x_1 x_3 - x_2 x_4 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 $\varphi_1(x)$ 、 $\varphi_2(x)$ 满足:

$$1) \begin{cases} L_{g1} \varphi_1(x) = \frac{\partial \varphi_1(x)}{\partial x} g_1(x, t) = 0 \\ L_{g2} \varphi_1(x) = \frac{\partial \varphi_1(x)}{\partial x} g_2(x, t) = 0 \\ L_{g1} \varphi_2(x) = \frac{\partial \varphi_2(x)}{\partial x} g_1(x, t) = 0 \\ L_{g2} \varphi_2(x) = \frac{\partial \varphi_2(x)}{\partial x} g_2(x, t) = 0 \end{cases}$$

$$2) \begin{bmatrix} \frac{L_2}{2}(x_1^2 + x_2^2) + \frac{C}{3}x_5^2 \\ -R_2(x_1^2 + x_2^2) - x_1x_3 - x_2x_4 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \text{的 Jacobi 矩阵}$$

$$\begin{bmatrix} L_2x_1 & L_2x_2 & 0 & 0 & \frac{2C}{3}x_5 \\ -R_2x_1 - x_3 & -R_2x_2 - x_4 & -x_1 & -x_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \neq 0$$

是满秩的,即 \$z\$ 微分同胚。

系统的约束条件为

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = L_f\varphi_1(x) \\ \dot{\xi}_2 = L_f\varphi_2(x) \end{cases} \quad (7)$$

原非线性系统可以转化为含式(8)所示约束条件的 Brunovsky 标准型。

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + Bv \\ y = Dz \end{cases} \quad (8)$$

式中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

矩阵 \$[B \ AB]\$ 的秩为 3,所以该线性系统可控。

新的控制变量为

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_2} \left[2R_2^2(x_1^2 + x_2^2) + 3R_2(x_1x_3 + x_2x_4) + \right. \\ \left. \frac{C}{3}x_5^2 \right] \\ -\frac{1}{C_e}(x_1^2 + x_2^2 - I_{2ca}x_1 - I_{2c\beta}x_2) \\ -\frac{x_5}{L_2} [(2R_2x_1 + x_3)\mu_1 + (2R_2x_2 + x_4)\mu_2] \\ -\frac{1}{L_2} [(R_2x_2 + x_4) - x_3\mu_2] \\ \frac{1}{C_e}(x_1 - i_{2ca}) \\ \frac{1}{C_e}(x_2 - i_{2c\beta}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

1.3 SSSC 控制器设计

对于 SSSC 的系统的变结构控制策略,在满足式(7)所示的约束条件下,对于式(8)所示的线性系

统,设 \$y\$ 的期望输出信号为 \$y^*\$ (下面带* 的变量表示为其输出指令值),跟踪误差为

$$e = [e_1 \ e_2]^T = [y_1^* - y_1 \ y_2^* - y_2]^T \quad (10)$$

选取滑模面方程为

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ce_1 + \frac{de_1}{dx} \\ e_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

选取指数趋近律

$$\dot{s}_i = -k_i s_i - \varepsilon_i \text{sgn}(s_i) \quad i=1, 2 \quad (12)$$

结合式(8)和式(12)式可得滑模控制律为

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{c}y_1 + k_1s_1 + \varepsilon_1 \text{sgn}(s_1) \\ k_2s_2 + \varepsilon_2 \text{sgn}(s_2) \end{bmatrix} \quad (13)$$

代入式(9)中得到原非线性系统的控制律为

$$\begin{cases} \mu_1 = \frac{L_2}{x_5(2R_2x_1 + x_3)} [-cy_1 + k_1s_1 + \varepsilon_1 \text{sgn}(s_1) \\ -\frac{1}{L_2}(2R_2x_1^2 - 3R_2x_1x_3 + x_3^2) + \frac{1}{C_e}(x_1^2 + x_2^2 - I_{2ca}x_1 - \\ I_{2c\beta}x_2) + (2R_2x_2 + x_4)(k_2s_2 + \varepsilon_2 \text{sgn}(s_2))] \\ \mu_2 = \frac{1}{x_5} [-R_2x_2 - x_4 + L_2k_2s_2 + L_2\varepsilon_2 \text{sgn}(s_2) \end{cases} \quad (14)$$

式中 \$k_i, \varepsilon_i (i=1, 2)\$ 为控制器设计参数,它们决定了控制系统的稳态和动态性能。

1.4 SSSC 抗干扰性能分析

上节设计了 SSSC 的变结构控制器,下面对所设计的控制器抗干扰性能进行分析,当系统存在扰动时,系统线性化处理后的 Brunovsky 标准型可以表示为式(15)所示。

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + Bv + \alpha(z) + \beta(v) \\ y = Dz + \gamma(z) \end{cases} \quad (15)$$

式中 \$\alpha(z), \beta(v), \gamma(z)\$ 为原来非线性系统 \$\Delta f(x, t), \Delta g(x, t)\$ 的相对应不确定项 \$\alpha(z), \beta(v), \gamma(z)\$ 有界,均小于某一常数。

将式(11)、式(13)代入式(15)得

$$\dot{s}_i = -k_i s_i - \varepsilon_i \text{sgn}(s_i) + \delta_i, \quad i=1, 2 \quad (16)$$

式中 \$\delta_i\$ 的取值为

$$\begin{cases} \delta_1 = -\alpha_2(z) - \beta_2(v) - \dot{\alpha}_1(z) - \dot{\beta}_1(v) - \ddot{\gamma}_1(z) \\ \delta_2 = -\alpha_3(z) - \beta_3(v) - \dot{\gamma}_2(z) \end{cases} \quad (17)$$

定义 Lyapunov 函数 \$V = \frac{1}{2}s^2\$, 则

$$\dot{V} = s^T \dot{s} = -\varepsilon s - ks^2 + \delta s \quad (18)$$

选取控制器参数

$$\begin{cases} k_i > 0 \\ \varepsilon_i > \max(\delta_i) \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (19)$$

则 $s^T \dot{s} < 0$ 滑模可达性条件成立, k_i 值越大, 系统到达滑模面的时间越短, 但抗干扰能力越差; 相反, ε_i 越大, 抗干扰能力越强, 但是需要的控制力越大, 引起的抖动也越大, 因此, 系统在设计要选择大的 k 值、较小的 ε 值。

1.5 SSSC 控制系统平衡点分析

SSSC 采用潮流控制方式, 通过控制直流电压来维持电容电压稳定。已知系统潮流指令值 p^* 、 Q^* 和直流电压指令值 U_{dc}^* , 为了得到跟踪信号值 y_1^* 、 y_2^* , 由选择的系统输出量 y_1 、 y_2 的表达式可知, 滤波电容侧电流 I_{cd}^* 、 I_{cq}^* 可通过式(20)和潮流指令值 p^* 、 Q^* 确定, 然后通过 $dq/\alpha\beta$ 转换得到 I_{ca}^* 、 I_{cb}^* 。 x_1^* 和 x_2^* 通过系统在无扰动情况下的平衡状态方程式(21)确定, 即

$$\begin{cases} I_{cd}^* = \frac{2(U_{cd}P_2^* + U_{cq}Q_2^*)}{3(U_{cd}^2 + U_{cq}^2)} \\ I_{cq}^* = \frac{2(U_{cq}P_2^* - U_{cd}Q_2^*)}{3(U_{cd}^2 + U_{cq}^2)} \end{cases} \quad (20)$$

$$\dot{x} = f(x, t) + g(x, t)\mu = 0 \quad (21)$$

2 仿真分析

所提出的 SSSC 输入-输出反馈线性化变结构控制框图表示如图 2 所示。为了验证该控制策略在电力系统中的有效性, 在 Matlab/Simulink 仿真平台上对其进行了仿真验证, 并和 PI 控制(控制策略见参考文献 [13])进行了对比, 系统采用空间矢量脉宽调制(SVPWM), 开关频率为 5 kHz, 潮流控制, 仿真参数为: 电网频率 $f = 50$ Hz; 电源电压有效值 $U_s = 220$ V, 初相角为 105° ; 输电线路等效电阻 $R_L = 2 \Omega$, $L_L = 25$ mH; 串联变压器变比 2:1; 串联侧滤波电感 $L_2 = 2$ mH; 串联变流器等效电阻 $R_2 = 0.01 \Omega$; 滤波电容 $C_s = 66 \mu\text{F}$; 直流电容 $C = 4700 \mu\text{F}$; 直流电压初始值 $U_{dc0} = 600$ V。

系统控制参数: $c = 1750$, $k_1 = k_2 = 3000$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 15$; PI 控制参数: 电流环 $k_p = 16.5$, $k_i = 825$; 电压环 $k_p = 3$, $k_i = 4.5$; 功率环 $k_p = 0.0013$, $k_3 = 10$; 直流电容控制器 $k_p = 1.5$, $k_i = 0.5$; 仿真结果如图 3~图 7 所示。

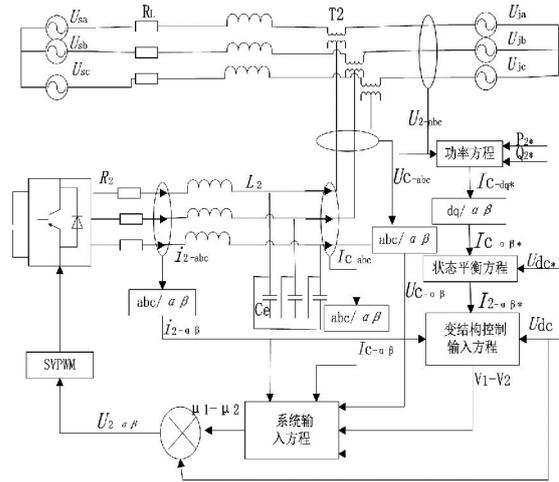


图 2 SSSC 控制框图

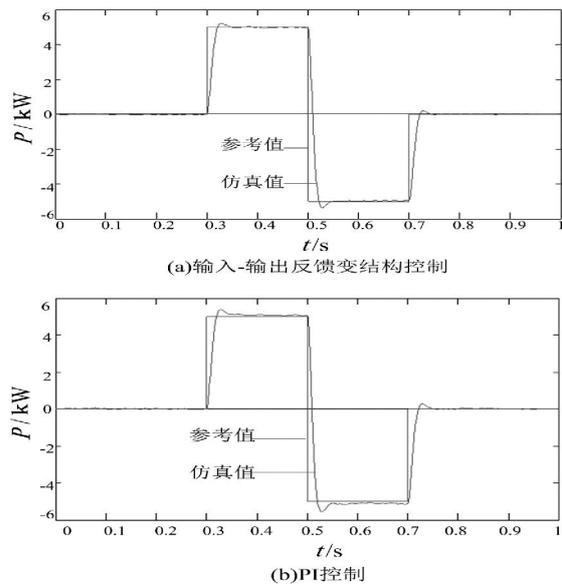


图 3 SSSC 注入系统有功功率

图 3 和图 4 为 SSSC 仿真模型中注入输电线路有功功率和无功功率, 初始值都为 0, 在 0.3 s 时有功功率阶跃到 5 kW, 无功功率阶跃至 2 kvar, 在 0.5 s 时有功功率阶跃至 -5 kW, 无功功率阶跃至 -2 kvar, 在 0.7 s 时有功功率和无功功率恢复至 0。由图中(a)、(b)对比可知, 输入-输出反馈线性化变结构控制和 PI 控制都能较好地跟踪输电线路的有功和无功, 但输入-输出反馈线性化变结构控制能在更小的超调量下进行跟踪。图 5 为输出电压响应曲线, 当注入的有功功率为正值时, 电容释放能量, 直流电容电压略微下降, 输出电压减小, 当注入有功功率为负值时, 电容充电, 输出电压升高。图 6 为输出电流响应曲线, 输出电流快速地跟踪潮流发生变化。图 7 为直流电容电压的仿真图, 从图中可以看出, 尽管两种控制方式都能很好地跟踪潮流, 但输入

—输出线性化变结构控制明显能够更好地维持直流电容电压保持在 600 V。

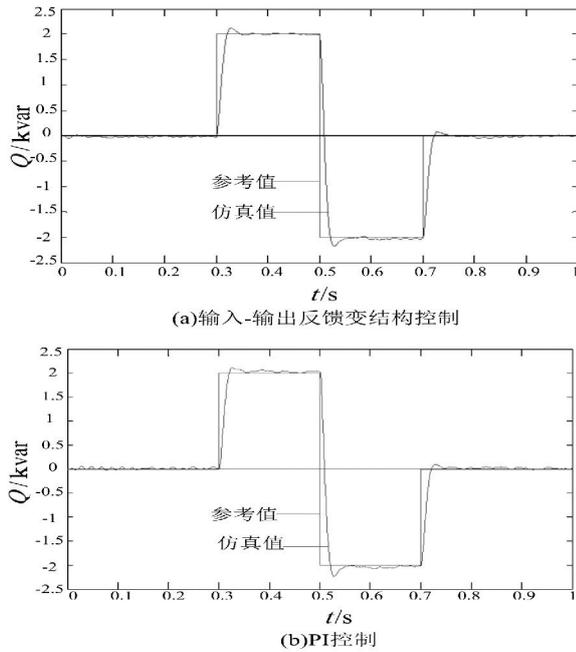


图4 SSSC注入系统无功功率

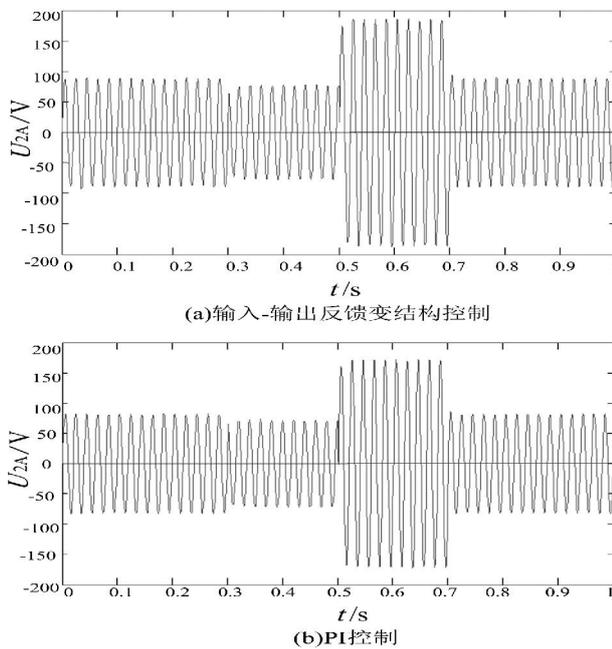


图5 SSSC输出交流电压

3 结论

提出了一种新的 SSSC 变结构控制策略。基于输入-输出反馈线性化理论,通过选择合适的输出函数、坐标变换将 SSSC 的非线性模型转化为 1 个含约束方程的 Brunovsky 标准型,再通过变结构控制

完成控制器的设计。仿真结果表明,与 PI 控制相比,该控制策略可以使系统获得更好的补偿效果,而且该方法响应快,对参数及扰动变化不敏感,具有一定的实际价值。

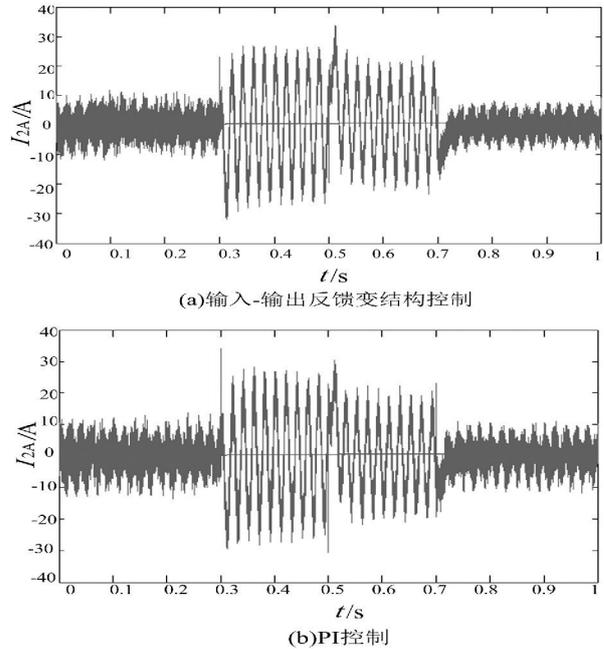


图6 SSSC直流电容电流

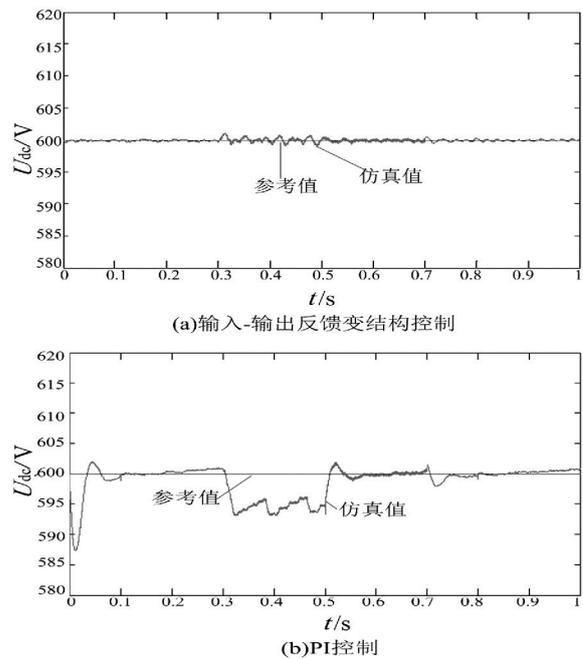


图7 SSSC直流电容电压

参考文献

- [1] Hingorani N G, Laszlon Gyugyi. Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems in New York [J]. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999, 22(3): 104-106.

- [2] Philip M, Ashmole P. Flexible AC Transmission Systems II Methods of Transmission Line Compensation [J]. Power Engineering Journal, 1996, 10(6): 273-278.
- [3] 王仲鸿, 沈斐, 吴铁铮. FACTS 技术研究现状及其在中国的应用与发展 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(23): 1-5.
- [4] 张爱国, 韩军锋, 蒋程. 基于神经网络自适应 PI 控制的 SSSC 潮流控制器 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 15-19, 24.
- [5] 张爱国, 张建华, 蒋程. 静止同步串联补偿器的恒阻抗模型及其双闭环控制策略 [J]. 电网技术, 2010, 34(3): 106-111.
- [6] 钱碧甫, 王奔, 徐万良. SSSC 滑模控制策略研究 [J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(7): 39-42, 46.
- [7] 颜伟, 吴文胜, 华智明, 等. SSSC 非线性控制的直接反馈线性化方法 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 65-68.
- [8] 李娟, 周兴福, 李淑琴. 基于精确反馈线性化方法的 SSSC 非线性控制器 [J]. 电网技术, 2008, 32(22): 12-15.
- [9] 赵洋, 肖湘宁. 基于微分几何方法的静止同步串联补偿器非线性控制 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(4): 132-136.
- [10] 刘永江. UPFC 控制策略研究及其对电力系统的影响 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011: 1-24.
- [11] 焦晓红, 关新平. 非线性控制系统分析与设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 18-43, 94-120.
- [12] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1996: 143-183.
- [13] 黄崇鑫. 统一潮流控制器控制策略的研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009: 1-78.
- [14] Jiang X, Xiao X N, Zhao Y. Study on Main Circuit Selection and Single Phase SVPWM Algorithm of SSSC [C]. 2006 International Conference on Power System Technology, 2006: 1-6.

作者简介:

贺双双(1989), 助理工程师, 硕士研究生, 毕业于西南交通大学电气工程学院;
曹建军(1968), 高级工程师, 本科, 毕业于新疆工学院;
陈智迪(1988), 助理工程师, 硕士研究生, 毕业于西南石油大学电子信息学院。

(收稿日期: 2015-05-04)

(上接第45页)

显示值, 进行各极的绝缘电阻(接地电阻值)监测误差计算和接地选线正确性判断, 完成后断开相应的支路断路器, 并调节电阻值至最大值。

4) 校验检测结果评判

完成全部组合方式的检测后, 按极性(正极或负极)选出最大误差值, 即是被测产品的误差, 根据接地选线的误选和漏选次数给予正确率判断。再依据示波器记录得到直流电压偏移和直流电压波动的最大值并给出是否超值的判断。

3 结论

依据对变电站直流电源系统用绝缘监测装置的校验检测技术与验证方法的研究, 按照 Q/GDW 1969-2013《变电站直流系统绝缘监测装置技术规范》的要求, 对涉及电力系统的发电厂升压站、变电站、换流站等站用直流电源绝缘监测装置, 采用 1 种

校验方法与装置, 实现了对其运行安全性、故障监测可靠性等方面的测评, 也为开展绝缘监测装置的运行维护和状态检修提供了参考, 以期最大限度地避免劣质产品引发或扩大电网事故。

参考文献

- [1] 赵梦欣, 陈国峰, 余成伟. 直流电源系统绝缘监测的直流漏电流改进方案 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 83-88.
- [2] 李瑞平, 温泉. 直流系统接地故障的分析 [J]. 华电技术, 2008, 30(2): 58-61.
- [3] 徐卫, 李晶. 加强直流电源系统运行维护和专业管理 [J]. 电源技术应用, 2007(3): 84-85.
- [4] 赵兵, 张曼诗, 徐玉凤. 直流系统微机型绝缘监察装置电阻选择的依据 [J]. 中国新技术产品, 2009(23): 160-161.

(收稿日期: 2015-05-14)