

SSSC 的有功和无功解耦策略

李胜¹, 张建华¹, 蒋程², 韩军锋²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 考虑 SSSC 的动态过程, 在两相同步旋转 d-q 坐标系下建立了装有 SSSC 的单机无穷大系统的 (SMIBS) 数学模型, 并基于此模型提出了有功无功动态解耦控制策略。为了验证本文所提控制策略的有效性, 在 Matlab/Simulink 动态仿真环境中搭建了含 SSSC 的单机无穷大系统的仿真模型, 并对有功和无功的调节过程进行了仿真, 仿真结果验证了该解耦控制策略的有效性。

关键词: 静止同步串联补偿器 SSSC; 动态解耦; 串联补偿

Active and reactive power flow decoupling method for SSSC

LI Sheng¹, ZHANG Jian-hua¹, JIANG Cheng², HAN Jun-feng²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The mathematics model for the single machine infinite bus system (SMIB) installed with SSSC is built up in a synchronously rotating d-q frame by using Park's transformation, in which the dynamic process of SSSC is taken into account. In this paper, a decoupling control method for the active and reactive power of power systems is proposed based on the built model of SMIB. In order to evaluate the proposed decoupling strategy, the simulation model of the SMIBS installed with SSSC is set up based on which the regulating process of the active and reactive power of power systems are simulated, respectively. The simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: static synchronous series compensator (SSSC); dynamic decouple; feed forward compensator

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)12-0020-03

0 引言

静止同步串联补偿器 (SSSC) 是串联在输电线上的装置。其原理是在线路上注入一个大小和线路电流无关的而相位和线路电流相位垂直的电压, 改变该电压大小就相当于改变线路的等效阻抗, 从而控制系统潮流。当然, 在实际电路中, 电压相位和线路电流相位并不是严格垂直的, 而是有一个很小的偏差, 其作用是为了补偿 SSSC 的损耗。当注入电压的相位超前线路电流相位 90° 时, 它就相当于在线路中串入电感, 从而, 线路电流和传输功率都减小, 相反, 当注入电压的相位滞后线路电流相位 90° 时, 它就相当于在线路中串入电容, 线路电流和传输功率增加^[1,2]。

以上分析表明 SSSC 可以控制传输线上的潮流。目前, 学者们提出了许多控制模型和策略, 文献[3]利用附加节点电流注入法设计了 SSSC 潮

流控制器, 但它是利用电流间接控制传输潮流, 这样会使系统反应时间变长, 动态性能较差。文献[4]基于 d-q 变换建立了 SSSC 模型, d-q 轴存在耦合。文献[5]建立了 SSSC 矢量模型, 采用双闭环控制策略, 控制效果很好, 但控制系统复杂。文献[6~9]提出了基于 d-q 坐标理论的 P-Q 矢量控制模型, 但 P-Q 存在耦合。文献[10, 11]在 abc 三相静止坐标系下建立 SSSC 控制模型, 原理简单, 易于实现, 但不利于控制器设计。文献[12]提出了一种解耦方法, 但只实现了电流的解耦。文献[13]提出了基于容错控制的解耦方法, 自适应能力强, 但系统相当复杂。

本文在两相同步旋转 d-q 坐标系下建立了装有 SSSC 双机系统的潮流方程, 应用输入变换实现了有功和无功的解耦, 用 Matlab 动态仿真工具对含有 SSSC 的双机系统进行了仿真, 仿真结果验证了此解耦方法的有效性。

1 SSSC 的数学模型

在不考虑 SSSC 的动态过程和谐波影响的情况下, SSSC 可以等效为电压源、电阻和电感的串联。装有 SSSC 的单机无穷大系统如图 1 所示。

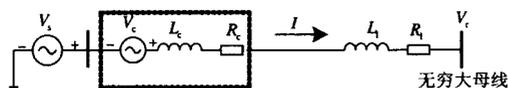


图 1 含 SSSC 的简单电力系统

Fig.1 A simple power system with SSSC

图 1 中, 系统采用三相星型连接, 且负载是三相对称的。其中 V_g 代表发电机端的电压, V_r 代表无穷大母线的电压, V_c 代表 SSSC 的逆变器发出的电压, L_c 、 R_c 和 L_l 、 R_l 分别代表 SSSC 和线路的电感和电阻, I 代表线路电流。由 KVL 可以得出含 SSSC 简单电力系统在三相静止坐标系下的数学模型, 如式(1)。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{sa} - V_{ra} + V_{ca} \\ V_{sb} - V_{rb} + V_{cb} \\ V_{sc} - V_{rc} + V_{cc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: V_{sa} 、 V_{sb} 、 V_{sc} 、 V_{ca} 、 V_{cb} 、 V_{cc} 和 V_{ra} 、 V_{rb} 、 V_{rc} 分别代表发电机端、SSSC 和无穷大系统的相电压, i_a 、 i_b 、 i_c 代表线路电流, $R = R_l + R_c$ 代表线路等效电阻, $L = L_l + L_c$ 代表线路电感。

根据式(1), 采用同步旋转变换可以得到 d-q 坐标系下 SSSC 的数学模型, 如式(2)所示。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{sd} - v_{rd} + v_{cd} \\ v_{sq} - v_{rq} + v_{cq} \end{bmatrix} \quad (2)$$

由瞬时功率理论可得无穷大母线端的潮流表达式, 如式(3)所示。

$$P = \frac{3}{2} |V_r| i_d \quad Q = -\frac{3}{2} |V_r| i_q \quad (3)$$

由式(3)可以得到给定参考值 i_d^* 、 i_q^* 的表达式, 如式(4)所示。

$$i_d^* = \frac{2P^*}{3|V_r|} \quad i_q^* = -\frac{2Q^*}{3|V_r|} \quad (4)$$

其中: P^* 、 Q^* 为给定的有功和无功功率。

2 动态解耦方法

由式(2)SSSC 的数学模型可重新写为:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S + \frac{R}{L} & -\omega \\ \omega & S + \frac{R}{L} \end{bmatrix}^{-1} \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{sd} - v_{rd} + v_{cd} \\ v_{sq} - v_{rq} + v_{cq} \end{bmatrix} \quad (5)$$

设:

$$G(S) = \begin{bmatrix} S + \frac{R}{L} & -\omega \\ \omega & S + \frac{R}{L} \end{bmatrix}^{-1} \quad (6)$$

由式(6)可以看出, d-q 之间存在耦合关系。而出现此问题的原因是传递函数矩阵 $G(S)$ 不是对角阵。假如传递函数矩阵 $G(S)$ 具有式(12)的形式, 就可以实现 d-q 之间的解耦。

$$D(S) = \begin{bmatrix} g_d & 0 \\ 0 & g_q \end{bmatrix} \quad (7)$$

因此, 构造了解耦模块 $F(S)$, 系统传递函数矩阵为: $G(S)F(S)$

$$\text{令: } G(S)F(S) = D(S) \quad (8)$$

分析式(5)可设:

$$D(S) = \begin{bmatrix} \frac{1}{R+LS} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R+LS} \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式(6)和式(9)可以计算出 $F(S)$ 为:

$$F(S) = G(S)^{-1} D(S) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & \frac{-\omega}{R+LS} \\ \frac{\omega}{R+LS} & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(10)即为解耦模块的具体参数, 在 SSSC 控制模型中加入该模块就可以实现有功和无功功率的动态解耦。

3 数字仿真

为了验证本文所提出的解耦策略的有效性, 在 Matlab/ Simulink 环境中搭建了被控系统仿真模型, 如图 2 所示。仿真参数见文献, 折算成标么值后如表 1 所示。

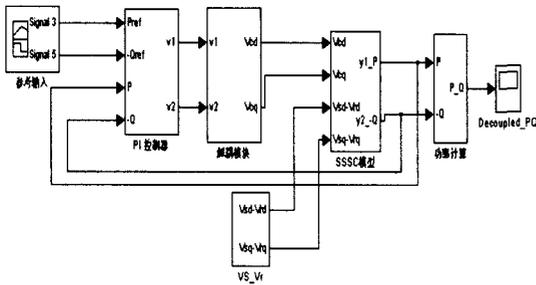


图 2 控制系统仿真模型
Fig.2 Simulation model for control system

表 1 仿真模型参数(标么值)

Tab.1 Parameters of the simulation model

发送端电压 V_s (相电压)	1.043∠30°
接收端电压 V_r (相电压)	1∠0°
线路电感 L_l	0.178 07
线路电阻 R_l	0.007 56
SSSC 等效输出电感 L_c	0.012 68
SSSC 等效输出电阻 R_c	0.000 065 6

图 3 为未加解耦模块系统仿真波形, 在 0.2 s 和 0.4 s, 当 P 阶跃变化时, Q 会有小的波动, 同样在 0.5 s 和 0.7 s, 当 Q 突然改变时, P 也会有小的波动, 从而影响了控制效率。

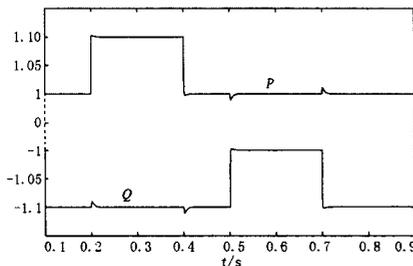


图 3 解耦前有功和无功功率随时间变化
Fig.3 Variation in active and reactive power flow without decouple block

图 4 为加入解耦模块的系统仿真波形, P 、 Q 的变化规律和未加解耦模块时的一样。仿真结果表明: 有功功率 P 和无功功率 Q 已实现了动态解耦。

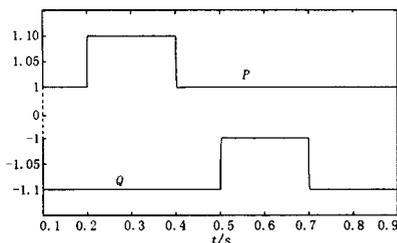


图 4 解耦后有功和无功功率随时间的变化
Fig.4 Variation in active and reactive power flow after decoupled

4 结论

本文通过对含 SSSC 单机无穷大系统的仿真分析和研究, 得如下结论:

本文所提出的有功无功解耦策略, 原理简单, 易于实现, 采用本文设计的解耦控制模块, 可以实现 P 和 Q 完全动态解耦, 从而实现了有功功率和无功功率的独立控制, 改善了控制效果, 提高了控制效率。

参考文献

- [1] Kalyan K S. SSSC-Static Series Compensator: Theory, Modeling and Applications[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1998,13(1):241-246.
- [2] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [3] 赵建军, 郭剑波, 周孝信. 利用附加节点注入电流法设计静止同步串联补偿器的潮流控制器[J]. 中国电机工程学报,2005,25(23):1-6.
ZHANG Jian-jun, GUO Jian-bo, ZHOU Xiao-xin. Using the Method of Injecting Current from Additional Nodes for Modeling and Simulation of SSSC Power Flow Controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23): 1-6.
- [4] 刘黎明, 康勇, 陈坚, 等. SSSC 建模、控制策略及性能[J]. 电工技术学报,2006,21(9):37-43.
LIU Li-ming, KANG Yong, CHEN Jian, et al. Static Synchronous Series Compensator: Modeling, Control Scheme and Performance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2006,21(9):37- 43.
- [5] Norouzi A H, Sharaf A M. Two Control Schemes to Enhance the Dynamic Performance of the STATCOM and SSSC[J]. IEEE Trans on Power Delivery,2005, 20(1):435-422.
- [6] 杨琪, 王辉. 基于神经网络控制算法的 SSSC 潮流控制器设计[J]. 电机电器技术,2002,(5):17-20.
YANG Qi, WANG Hui. Designing of the SSSC Flow Controller Based on Neural Network Arithmetic[J]. Technology of Electric Machine and Appliance, 2002, (5):17-20
- [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
YAN Wei, WU Wen-sheng, HUA Zhi-ming, et al. Direct Feedback Linearization Method for Designing SSSC Nonlinear Control Law[J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(3):65-68.
- [8] 王辉, 王耀南, 许维东. 基于模糊自整定 PI 控制的 SSSC 潮流控制器研究[J]. 电工技术学报,2004, 19(7):65-69.

(下转第 31 页 continued on page 31)

- Theory Concepts in Single Auction Power Pools [J]. Electric Power System Research, 2007, (77):630-636.
- [4] Jong-hae PARK, KIM B H, et al. A Continuous Strategy Game for Power Transactions Analysis in Competitive Electricity Markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(4):847-855.
- [5] YANG Zheng-lin, SONG Yan-min, CAO Rong-zhang, et al. Analysis on Bidding Strategy of Power Provider by Game Theory[A]. In: International Conference on Power System Technology[C]. 2006.
- [6] Messerschmidt L, Engelbrecht A P. Learning to Play Games Using a PSO-based Competitive Learning Approach[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2004, 8(3):280-288.
- [7] Xiong G F, Hashiyama T, Okuma S. An Evolutionary Computation for Supplier Bidding Strategy in Electricity Auction Market[A]. In: Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference[C]. 2002.83-88.
- [8] Cau T D H, Anderson E J. A Co-evolutionary Approach to Modelling the Behaviour of Participants in Competitive Electricity Markets[A]. In: Proceedings of IEEE PES Summer Meeting 2002[C]. Chicago: 2002.1534-1540.
- [9] 曾次玲, 张步涵, 谢培元. 进化博弈论在发电报价策略研究中的应用[J]. 继电器, 2005, 33(2): 13-17. ZENG Ci-ling, ZHANG Bu-han, XIE Pei-yuan. Application of Evolutionary Game Theory in Power Supply Bidding Strategies[J]. Relay, 2005, 33(2): 13-17.
- [10] 蒙特, 等. 博弈论与经济学[M]. 张琦, 译. 北京: 经济管理出版社, 2004. Montet, et al. Game Theory & Economics [M]. ZHANG Qi, Trans. Beijing: Economic Management Publishing House, 2004.
- [11] 威布尔 W. 演化博弈论[M]. 王永钦, 译. 上海: 上海人民出版社, 2006. Weibull W. Evolutionary Game Theory[M]. WANG Yong-qin, trans. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 2006.
- [12] Selten R. A Note on Evolutionary Stable Strategies in Asymmetric Animal Conflicts[J]. 1980, 84: 93-101.
- [13] Mayard Smith J. Evolution and the Theory of Games [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- [14] Friedman D. On Economic Applications of Evolutionary Game[J]. Theory Journal of Evolutionary Economics, 1998, 8(1):15-43.
- [15] Gintis H. Game Theory Evolving[M]. Princeton University Press, 2000.

收稿日期: 2008-08-01; 修回日期: 2008-10-10

作者简介:

黄仙(1966-), 男, 博士, 主要研究方向为复杂系统分析、系统综合评价与决策等;

王占华(1980-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为演化博弈论及其在电力市场中的应用. E-mail: wangzh-1980@163.com

(上接第 22 页 continued from page 22)

- WANG Hui, WANG Yao-nan, XU Wei-dong. Investigation of a Power Flow Controller of SSSC Based on Self-Turning PI Controller with Fuzzy Logic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(7):65-69.
- [9] 王庆红, 胡国根. 一种基于 48 脉波电压源逆变器的静止同步串联补偿器的设计与建模[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5):61-66. WANG Qi-hong, HU Guo-gen. Modeling and Control Design of a 48-step Inverter Based Static Synchronous Series Compensator[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5):61-66.
- [10] Haro P Z, Ramirez J M. SSSC's Adaptive Neural Control[A]. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. Vancouver(Canada):2006.
- [11] Fawzi A L. Influence of Mode of Operation of the SSSC on the Small Disturbance and Transient Stability of a Radial Power System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2):935-942.
- [12] Ahmadian T M, Kazemi A. A Decoupling Technique to Improve the Efficacy of the Vector Control Model for SSSC[A]. In: IEEE Power India Conference[C]. Bombay(India): 2006.
- [13] Wei Qiao, Harley G, Ganesh K. A Fault-Tolerant P-Q Decoupled Control Scheme for Static Synchronous Series Compensator[A]. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. Montreal(Canada): 2006.
- [14] 姜旭, 肖湘宁, 赵洋. H 桥级联式 SSSC 阻抗补偿域及准稳态模型[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4):136-143. JIANG Xu, XIAO Xiang-ning, ZHAO Yang. Impedance Compensation Domain and Quasi-Steady State Model of H-Bridge Cascaded SSSC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(4):136-143.

收稿日期: 2008-09-27; 修回日期: 2009-03-16

作者简介:

李胜(1976-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为柔性直流输电, 电力电子技术在电力系统中的应用等; E-mail: lisheng-2002@sohu.com

张建华(1952-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统运行、分析与控制及应急管理的研究;

蒋程(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用。