

采用模糊滑模变结构控制策略的 静止同步补偿器控制方法

单翀¹, 王奔¹, 邓家泽², 钱碧甫¹, 赵茜茜¹

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川省 成都市 610031;

2. 广州市电力工程设计院有限公司, 广东省 广州市 510220)

A Control Method for STATCOM Applying Fuzzy Sliding-Mode Variable-Structure Control Strategy

SHAN Chonghao¹, WANG Ben¹, DENG Jiase², QIAN Bifu¹, ZHAO Qianqian¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China;

2. Guangzhou Power Engineering Design Co., Ltd., Guangzhou 510220, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: When power system is in higher degree of unbalancedness, the compensating currents offered by different phases of static synchronous compensator (STATCOM) differ greatly, and such a differences will frequently restrain compensation range of STATCOM. To remedy this defect, it is proposed to use three single-phase STATCOM to compensate unbalanced load current, and each single-phase STATCOM is controlled by fuzzy sliding-mode variable-structure control strategy respectively to modify compensating current in time and rapidly decrease the degree of unbalancedness in power system. Results of simulation based on Matlab/Simulink verify the effectiveness of the proposed method.

KEY WORDS: static synchronous compensator(STATCOM); unbalanced load; reactive power compensation; fuzzy sliding-mode variable structure

摘要: 系统不平衡度较高时, 静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)提供的各相补偿电流相差较大, 这往往会限制 STATCOM 的补偿范围。为此利用 3 组单相 STATCOM 对不平衡负载电流进行补偿, 通过模糊滑模变结构控制方法对每相 STATCOM 进行单独控制, 及时修正补偿电流, 快速降低系统不平衡程度。仿真算例验证了该方法的有效性。

关键词: 静止同步补偿器; 不平衡负载; 无功补偿; 模糊滑模变结构

0 引言

近年来, 静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)在无功补偿领域中的应用越来越广泛^[1-3]。目前, 牵引机车、电弧炉和轧机等

不平衡用电设备的大量应用对电力系统的电能质量及安全稳定运行带来了不利影响^[4], 为此需要对不平衡负载进行补偿, 如可利用 STATCOM 进行补偿。不平衡负载补偿过程中所需的三相补偿电流通常是不平衡的, 因而可能会出现某一相或两相补偿电流较大, 接近 STATCOM 补偿容量极限, 而其他相所需补偿电流却很小, 这样易造成 STATCOM 容量浪费, 限制其补偿范围。同时由于 STATCOM 结构复杂, 采用何种控制策略才能更有效达到控制目的也成为一个需要考虑的实际问题。本文将采用模糊滑模变结构控制策略实现对 STATCOM 的控制, 以提供合理的补偿电流。

1 不平衡负载补偿电流

负载内部结构对于系统而言并不重要, 系统关心的是负载或补偿装置需要从系统吸收或向系统提供的电流。如图 1 所示, 将负载和补偿装置看作独立于系统以外的黑匣子。负载不平衡时, 系统提供给负载的三相电流也不平衡, 为了减小系统的不平衡程度, 需要安装补偿装置对负载三相电流进行补偿。

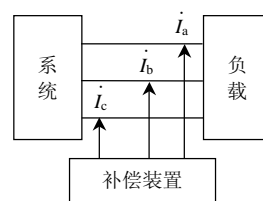


图 1 补偿原理

Fig. 1 Compensation principle

补偿装置内部的线电流(\dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c)和相电流(\dot{I}_{ab} 、 \dot{I}_{bc} 、 \dot{I}_{ca})(如图2所示)满足如下关系^[5]:

$$\begin{cases} \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = \dot{I}_a \\ \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = \dot{I}_b \\ \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = \dot{I}_c \end{cases} \quad (1)$$

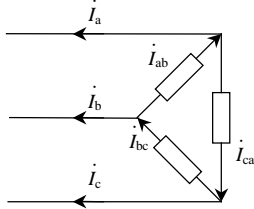


图2 补偿电流

Fig. 2 Compensation currents

式(1)也可表达为

$$\mathbf{A}\mathbf{I}_p = \mathbf{I}_L \quad (2)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{I}_p = \begin{bmatrix} \dot{I}_{ab} \\ \dot{I}_{bc} \\ \dot{I}_{ca} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{I}_L = \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix}。$$

矩阵 \mathbf{A} 的秩为2, 小于矩阵维数3, 因此式(2)有无穷多个解, 即在所提供的补偿线电流一定时, 对于三角形接线的补偿装置来说, 其相电流的选择可以有无穷多组, 而优化目标就是要选出一组相电流, 使其最大相电流在所有可能的相电流组合中是最小的。

某组相电流中最大相电流记为 I_{\max} , 即 $I_{\max} = \max(I_{ab}, I_{bc}, I_{ca})$, 优化后最大相电流为

$$I_{\max 0} = \min I_{\max} \quad (3)$$

$I_{\max 0}$ 具体求解方法详见参考文献[6]。

可以任意选取补偿电流是实现补偿电流优化设计的前提, 而只有将补偿装置进行三角形连接方能做到这一点, 因而补偿装置须采用三角形连接, 并且补偿装置需具有分相控制能力, 因此本文补偿装置采用3组单相STATCOM三角形连接而成^[7-9], 其主电路如图3所示。 u_a 、 u_b 、 u_c 为系统侧三相对称电源电压, I_{ab} 、 I_{bc} 、 I_{ca} 分别为3组单相STATCOM输出的补偿电流, R_s 、 L 分别为滤波电抗器的电阻和电感, C 为直流侧电容(C 为3个单相STATCOM共用)。

如图3所示, 补偿装置的每一相都可视为单相STATCOM, 可对不平衡负载进行分相补偿。3组单相STATCOM直流侧接在一起, 共用一个电容器, 这样可以减少电容器配置, 节约成本。为防止电容器烧毁, 需在逆变桥的交流侧加装隔离变压器。

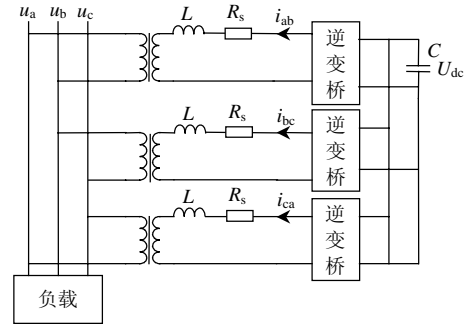


图3 不平衡负载补偿的主电路

Fig. 3 Main circuit configuration of unbalance loads compensation

2 STATCOM 控制方法

2.1 补偿电流计算

设负载三相线电流分别为 \dot{I}_A 、 \dot{I}_B 、 \dot{I}_C , 则

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{A2} \\ \dot{I}_{A0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: \dot{I}_{A1} 、 \dot{I}_{A2} 、 \dot{I}_{A0} 分别为 \dot{I}_A 的正序分量、负序分量和零序分量; a 为复数算子, $a = e^{j(2\pi/3)} = -1/2 + j\sqrt{3}/2$ 。

其余2相线电流的正序分量、负序分量和零序分量分别为

$$\begin{cases} \dot{I}_{B1} = e^{-j120^\circ} \dot{I}_{A1} = a^2 \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{C1} = e^{j120^\circ} \dot{I}_{A1} = a \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{B2} = e^{-j120^\circ} \dot{I}_{A2} = a \dot{I}_{A2} \\ \dot{I}_{C2} = e^{j120^\circ} \dot{I}_{A2} = a^2 \dot{I}_{A2} \\ \dot{I}_{B0} = \dot{I}_{C0} = \dot{I}_{A0} \end{cases}$$

各相线电流与正序分量、负序分量以及零序分量之间的关系为:

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2} + \dot{I}_{B0} \\ \dot{I}_B = \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{B0} \\ \dot{I}_C = \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2} + \dot{I}_{C0} \end{cases} \quad (5)$$

正序分量实部代表有功分量, 可由系统直接提供, 正序分量虚部代表无功分量, 可由补偿装置进行补偿。而负序分量应该全部由补偿装置提供。因此, 将正序分量的虚部和负序分量相加, 再通过类似式(4)的反变换, 即可得三相负载各自所需的补偿电流(\dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c)。

在 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c 确定后, 即可通过式(3)及文献[6]方法确定补偿装置三相相电流 \dot{I}_{ab} 、 \dot{I}_{bc} 、 \dot{I}_{ca} 。

2.2 模糊滑模变结构控制方法

令 S_a 、 S_b 、 S_c 分别为3个单相STATCOM的开

关信号, 则

$$\begin{cases} L \frac{dI_{ab}}{dt} = u_{ab} - R_s I_{ab} - S_a U_{dc} \\ L \frac{dI_{bc}}{dt} = u_{bc} - R_s I_{bc} - S_b U_{dc} \\ L \frac{dI_{ca}}{dt} = u_{ca} - R_s I_{ca} - S_c U_{dc} \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a I_{ab} + S_b I_{bc} + S_c I_{ca} \end{cases} \quad (6)$$

3个独立的单相 STATCOM 需分别控制, 且控制方法相同, 现取补偿电流 I_{ab} 为例说明控制方法。

根据逆系统方法, 对式(6)中 $L \frac{dI_{ab}}{dt} = u_{ab} - R_s I_{ab} - S_a U_{dc}$, 选取状态变量 $x_1 = I_{ab}$ 、输出变量 $y_1 = I_{ab}$ 、输入变量 $u_1 = S_a$, 则

$$L \frac{dx_1}{dt} = u_{ab} - R_s x_1 - u_1 U_{dc} \quad (7)$$

根据系统求逆方法^[10-12], 式(8)可变换为

$$\dot{y}_1 = (u_{ab} - R_s x_1 - u_1 U_{dc}) / L \quad (8)$$

则

$$u_1 = (u_{ab} - R_s x_1 - L \dot{y}_1) / U_{dc} \quad (9)$$

令 $\dot{y}_1 = v_1$, v_1 为虚拟控制量, 则由式(10)可得

$$u_1 = (u_{ab} - R_s x_1 - L v_1) / U_{dc} \quad (10)$$

对于 $\dot{y}_1 = v_1$ 所示的线性系统取滑模面:

$$S = I_{ab}^* - I_{ab} \quad (11)$$

式中 I_{ab}^* 为补偿电流参考值。

对式(11)两边求导, 则

$$\dot{S} = \frac{dI_{ab}^*}{dt} - \frac{dI_{ab}}{dt} \quad (12)$$

在变结构控制中, 希望状态变量按一定指数规律(取变结构控制的指数趋近律^[13])到达切换面, 则

$$\dot{S} = -kS - \varepsilon \operatorname{sgn}(S) \quad (13)$$

式中: k 、 ε 为大于 0 的常数; $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。当 S 趋近于 0 时, kS 趋近于 0, 但 $\varepsilon \operatorname{sgn}(S)$ 并不趋近于 0, 因此 \dot{S} 也不趋于 0, 系统状态将会反复穿越滑模面而造成抖振, 并且抖振强度由 ε 来决定^[10]。为了消除抖振, 本文设计了一维模糊控制器, 根据 $|S|$ 实时调整趋近律参数, 将输入变量 $|S|$ 和输出变量 ε 量化为零(ZR)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)4个等级, 并在接近滑模面 $S=0$ 时进行细分, 远离滑模面 $S=0$ 时进行粗分。

根据控制经验, $|S|$ 为正大时, 表示系统状态远离滑模面, 因此需要一个大的趋近律参数 ε 使趋近速度加快, 即 ε 应为正大; $|S|$ 为正小时, 表示系统状态离滑模面较近, 因此需要一个较小的 ε 使趋近

速度变慢, 以减小抖振, 即 ε 应为正小。

采用 Mamdani 推理方法^[14-15]实现上述控制规则, 采用重心法^[16]解模糊, 清晰化控制量 ε_0 为

$$\varepsilon_0 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \mu_B(b_i) b_i}{\sum_{i=1}^n \mu_B(b_i)} \right] \quad (14)$$

式中: b_i 为输出论域中的一个点; $\mu_B(b_i)$ 表示 b_i 点的隶属度。 ε_0 确定后再经过比例变换即可获得实际控制量 ε 。

由 $\dot{y}_1 = v_1$ 及式(13)(14)可得

$$v_1 = k \left(\frac{dI_{ab}^*}{dt} - \frac{dI_{ab}}{dt} \right) + \varepsilon \operatorname{sgn} \left(\frac{dI_{ab}^*}{dt} - \frac{dI_{ab}}{dt} \right) \quad (15)$$

将式(15)代入式(10)即得到最终的控制表达式。

由于系统侧存在滤波电阻 R_s , 补偿电流中有可能包含有功分量, 该有功分量会流动到直流侧, 造成直流电压稳态误差, 为了消除该稳态误差需要增加一个对电容电压的控制环节, 即根据电压变化计算补偿电流的修正量, 并将该修正量叠加到补偿电流参考量上。因此, 附加一个 PI 控制环节对 I_{ab}^* 进行修正:

$$I_{ab}^* = [k_p (U_{dc}^* - U_{dc}) + k_i \int (U_{dc}^* - U_{dc}) dt] e^{j\omega t + \theta} + I_{ab}^*$$

式中: θ 与交流侧线电压 U_{ab} 相角相同; k_p 、 k_i 为该 PI 环节的控制参数。

3 仿真算例

本节采用 Matlab/Simulink 对本文方法进行仿真验证。仿真参数为: 电压峰值 $U_m=311\text{V}$, $f=50\text{Hz}$, $L=6\text{mH}$, $R_s=0.1\ \Omega$, $C=2.2\ \text{nF}$ 。负载包括 2 部分: 一部分为接成星型的对称电阻性负载, 每支路电阻为 $2.0\ \Omega$; 另一部分为波动性感性负载, 电抗值在 $3.5\sim 15.7\text{mH}$ 之间波动。

图 4 为负载电流变化曲线, 在 0.05s 和 0.1s 时负载发生较大波动, 负载电流不平衡程度较大。

图 5 为采用本文方法补偿后接入点系统电流曲线。由图 5 可知, STATCOM 在模糊滑膜变结构控制器作用下, 能够迅速做出响应, 使系统电流在短时间内重新恢复平衡, 系统电流波形在短时间内基

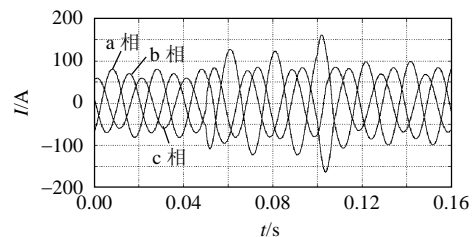


图 4 负载电流

Fig. 4 Load currents

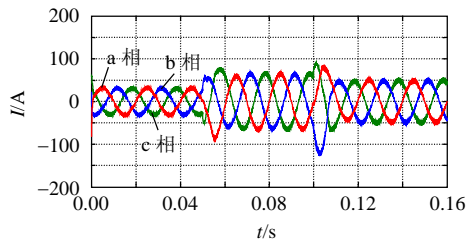


图5 补偿后系统电流

Fig. 5 Currents of system after compensation

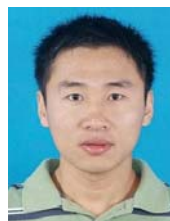
本恢复为正弦波。

4 结论

本文采用模糊滑模变结构控制策略实现了3组单相STATCOM对不平衡负载的优化补偿,提高了STATCOM控制精度,提高了补偿设备利用率,改善了系统不平衡度,可为STATCOM无功补偿控制提供参考。

参考文献

- [1] 韩学军, 王晶浩, 潘超, 等. 综合补偿三相不平衡负载的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(S2): 306-309.
Han Xuejun, Wang Jinghao, Pan Chao, et al. Research on integrated compensation of three phase unbalance load[J]. Power System Technology, 2006, 30(S2): 306-309(in Chinese).
- [2] 罗安, 欧剑波, 唐杰, 等. 补偿配电网电压不平衡的静止同步补偿器控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(6): 55-60.
Luo An, Ou Jianbo, Tang Jie, et al. Research on control method of STATCOM for grid voltage unbalance compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(6): 55-60(in Chinese).
- [3] 刘文华, 刘炳, 王志泳, 等. 基于IGBT三电平逆变器的±100 kvar D-STATCOM[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(1): 70-73, 77.
Liu Wenhua, Liu Bing, Wang Zhiyong, et al. ±100 kvar D-STATCOM based on IGBT tri-level inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(1): 70-73, 77(in Chinese).
- [4] 邓家泽. 不平衡负荷无功与负序电流的综合补偿研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [5] 朱永强, 宋强, 刘文华, 等. D-STATCOM不平衡负荷补偿电流的优化设计[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(8): 65-69.
Zhu Yongqiang, Liu Wenhua, Song Qiang, et al. Optional design of compensation currents for D-STATCOM used for unbalanced load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(8): 65-69(in Chinese).
- [6] 朱永强. D-STATCOM不平衡负荷补偿电流的3种设计方案[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 75-79.
Zhu Yongqiang. Three design schemes of compensation currents for D-STATCOM used for unbalanced load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 75-79(in Chinese).
- [7] 许树楷, 宋强, 朱永强, 等. 用于不平衡补偿的变压器隔离型链式D-STATCOM的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 137-143.
Xu Shukai, Song Qiang, Zhu Yongqiang, et al. Research on the transformer-isolated multilevel H-bridges D-STATCOM for unbalanced load compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 137-143(in Chinese).
- [8] 朱永强, 刘文华, 邱东刚, 等. 基于单相STATCOM的不平衡负荷平衡化补偿的仿真研究[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 42-45.
Zhu Yongqiang, Liu Wenhua, Qiu Donggang, et al. Simulation of balancing compensation of unbalanced load based on single phase STATCOM[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 42-45(in Chinese).
- [9] 孙树勤. 无功补偿的矢量控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 65-82.
- [10] 李春文, 冯元琨. 多变量非线性控制的逆系统方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991: 19-58.
- [11] 李东海, 姜学智, 李立琴, 等. 逆系统方法在电力系统控制中的应用[J]. 电网技术, 1997, 21(7): 10-12.
Li Donghai, Jiang Xuezh, Li Liqin, et al. The inverse system method applied to power system control[J]. Power System Technology, 1997, 21(7): 10-12(in Chinese).
- [12] 王宝华, 杨成梧. 逆系统方法在TCSC稳定控制中的应用[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 41-43.
Wang Baohua, Yang Chengwu. Application of inverse system method to TCSC stability control[J]. Power System Technology, 2001, 25(9): 41-43(in Chinese).
- [13] 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: 34-36.
- [14] Mamdani E H. Applications of fuzzy algorithms for control a simple dynamic plant[J]. Proceedings of IEEE, 1974, 121(12): 1585-1588.
- [15] 张峦. 静止无功补偿器的模糊变结构控制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2006.
- [16] 赵辉, 刘鲁源, 王红君, 等. 规则自适应模糊控制在同步发电机励磁系统中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 27-29.
Zhao Hui, Liu Luyuan, Wang Hongjun, et al. Application of rule adaptive fuzzy control in synchronous generator exciting system[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 27-29(in Chinese).



单翀峰

收稿日期: 2010-04-27.

作者简介:

单翀峰(1983), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定与控制, E-mail: shanchonghao@yahoo.com.cn;

王奔(1960), 男, 教授, 博士后, 研究方向为电力系统非线性控制。

(编辑 徐梅)