

D-STATCOM 自适应检测算法的研究

刘亮¹, 邓名高², 欧阳红林³

(1. 长沙大学, 湖南 长沙 410003; 2. 威胜集团, 湖南 长沙 410013; 3. 湖南大学, 湖南 长沙 410082)

摘要: 提出了一种新颖的配网连续动态无功发生器 (D-STATCOM) 指令电流检测法——参考模型自适应检测法。参考模型自适应指令电流检测法是一种在线的自调节算法, 运用 MATLAB/Simulink 工具对 FBD 法和自适应检测法进行仿真分析, D-STATCOM 的指令电流检测算法采用参考模型自适应方法时, 补偿的动态响应时间快, 动态性能最佳。仿真和实验结果论证参考模型自适应检测法的有效性, 同时工程现场应用的稳定运行, 证明了运用自适应检测算法的 D-STATCOM 装置动态补偿无功功率和三相不平衡、抑制谐波时, 具有良好的动态性和实用性。

关键词: 参考模型自适应控制; 配网连续动态无功发生器; 指令电流检测法; FBD 法; 无功补偿

A research of adaptive detection algorithm for D-STATCOM

LIU Liang¹, DENG Ming-gao², OUYANG Hong-lin³

(1.Changsha University, Changsha 410003, China; 2.Wasion Meters Group, Changsha 410013, China;
3. Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This paper puts forward a new instruction current detection method, namely the model reference adaptive control algorithm for Distribution Static Compensator (D-STATCOM). The method is a kind of instructions from the adjustment of the online algorithm. Using MATLAB/Simulink tool for simulation of FBD method and adaptive method, results show that the dynamic response is fastest and the performance is best when using the adaptive control algorithm of DSTATCOM for compensation of reactive power and unbalanced loading. Simulation and experimental results demonstrate the effectiveness of model reference adaptive algorithm, and the stable operation of application, also proves that using adaptive detection algorithm of D-STATCOM device to dynamically compensate reactive power and unbalanced three-phase and restrain harmonics has good dynamics and practicability.

Key words: model reference adaptive control; distribution static compensator (D-STATCOM); instruction current detection algorithm; FBD; compensation of reactive power

中图分类号: TM761; TN713.8 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)05-0115-05

0 引言

高级电力电子技术是智能电网涉及的关键技术之一, 电力电子产业出现了以 SVC (Static Var Compensator) 为代表的柔性交流输电技术, 以及以配网连续动态无功发生器 D-STATCOM (Distribution Static Compensator) 为代表的用户电力技术。D-STATCOM 具有补偿无功和不平衡及滤除谐波等功能, D-STATCOM 补偿性能由指令电流检测算法所决定^[1]。已有大量文献对指令电流检测算法进行研究, 如瞬时无功功率理论、FBD (Fryze Buchholz Depenbrock) 法, 同步旋转变换理论 SRF (Synchronous Reference Frame)、神经网络控制算法等^[2]。

本文提出了一种新的参考模型自适应指令电流检测算法, 该算法是一种正序电流成分按线性模型自适应跟踪参考电流, 它运用最小二乘法通过自适应计算出参考电流的权值, 简单且无相移。文中详细分析了 D-STATCOM 采用参考模型自适应指令电流检测算法的补偿性能, 并运用 Matlab 进行仿真研究, 仿真结果表明该检测算法具有良好的动态性, D-STATCOM 现场工程应用证明了自适应指令电流检测算法对无功补偿和谐波抑制具有良好的效果。

1 D-STATCOM 工作原理

D-STATCOM 是一种用于动态补偿无功、抑制谐波和补偿三相不平衡的新型电力电子装置, 它能对大小和频率同时变化的无功和谐波进行补偿, 克

服LCF滤波器等传统的无功补偿和谐波抑制方法的缺点。D-STATCOM系统电路结构框图如图1所示，系统框图由三相三线配变系统、D-STATCOM装置和非线性负载构成，D-STATCOM装置并联于配变系统中^[3]。

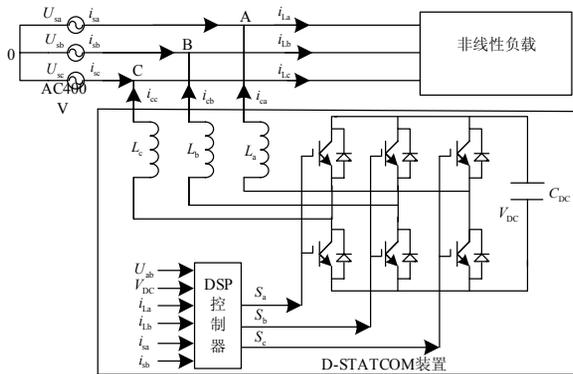


图1 D-STATCOM 系统电路结构框图

Fig.1 Circuit structure diagram of D-STATCOM system

D-STATCOM的工作原理是检测补偿对象的电压和电流，经指令电流检测算法计算得到补偿电流的指令电流，对指令电流运用控制算法得出补偿电流的指令信号，并由该信号确定IGBT驱动脉冲，从而得到输出补偿电流，补偿电流与负载电流需补偿的无功及谐波等电流抵消，最终电网侧得到期望的正弦电流^[4]。设负载电流 i_L 由基波正序有功电流 i_p^+ 、基波正序无功电流 i_q^+ 、基波负序电流 i^- 、基波零序电流 i_0 和谐波电流 i_h 组成，即：

$$i_L = i_p^+ + i_q^+ + i^- + i_0 + i_h \quad (1)$$

若D-STATCOM的输出补偿电流 i_c 为：

- a) if $i_c = i_q^+$, then D-STATCOM补偿负载中的无功功率；
- b) if $i_c = i^-$, then D-STATCOM补偿负载中的负序分量；
- c) if $i_c = i_0$, then D-STATCOM补偿负载中的零序分量；
- d) if $i_c = i_h$, then D-STATCOM补偿负载中的谐波电流；

因此，D-STATCOM补偿无功、补偿不平衡和抑制谐波功能运用由指令电流的控制算法决定，但指令电流检测算法将负载电流检测成为关键因，对负载的无功补偿和谐波抑制效果具有确定性作用。

2 参考模型自适应检测算法

自适应控制方法是现代控制理论中不断发展

的一种重要方法，在解决非线性时变系统的控制问题中得到十分广泛的应用^[5]，参考模型自适应控制系统(MRAS:model reference adaptive system)就是自适应控制理论中最重要的发展方向之一。

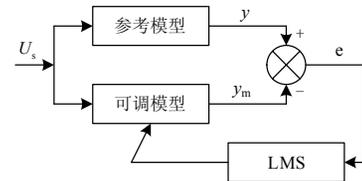


图2 并联型模型参考自适应框图

Fig.2 Parallel type model reference adaptive diagram

MRAS 的并联型模型结构如图2所示，在这个系统中，采用了一个称为参考模型的辅助系统。加到可调系统的参考输入 u_s 同时也加入到这个参考模型的输入端，参考模型的输出或状态可以用规定的或者期望的指标设计。为了比较规定的性能指标和可调系统实测的性能指标，可用减法器将参考模型和可调模型的输出或状态直接相减，得到广义误差信号 e 。自适应机构按一定的准则利用广义误差信号来修改可调系统的调节器参数，使广义误差的某个泛函指标达到极小值。当可调系统特性与参考模型特性渐渐逼近，广义误差将趋于极小或下降为零，调节过程结束^[6]。

参考模型的状态方程

$$\begin{cases} \dot{x}_M = A_M x_M + B_M u_M \\ y_M = C_M x_M \end{cases} \quad (2)$$

可调模型的状态方程

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (3)$$

两个模型的输出误差定义为

$$e = y - y_M \quad (4)$$

把MRAS方法用于D-STATCOM指令电流检测时，参考模型对应着真实物理对象，可调模型是构造出来的，通过自适应率来调节模型的参数使广义误差为零，就能够使可调模型的参数与参考模型的相同，达到指令电流检测的目的。

参考模型自适应指令电流检测法方框图如图3所示，这种算法是基于检测出负载电流中与参考单位电压同相的电流成分^[7]。

为了检测出负载电流基波正序电流成分，设公共接入点(PCC)的电压为系统电压 u_s ， u_s 与参考单位电压 u_p 同相， u_s 经带通滤波器滤波，得到直流分量为其幅值。设负载电流如式(1)所示。

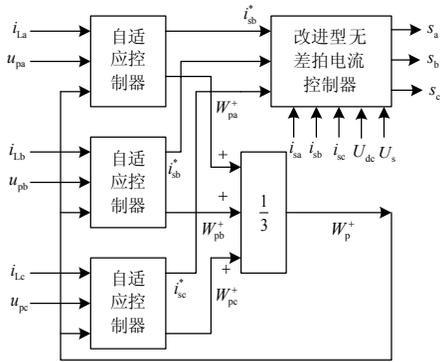


图 3 自适应指令电流检测法方框图

Fig.3 Block diagram adaptive reference current extraction

单相负载电流的正序有功可调模型为:

$$i_p^+ = W_p \times u_p \quad (5)$$

其中: W_p 是一个变量, 它随着电流和相应电压幅值的变化而变化, 其值通过最小二乘法 (LMS) 误差信号 e 达以最小, 如式 (7)

$$e = i_{L(k)} - W_{p(k)} u_{p(k)} \quad (6)$$

$$W_{p(k+1)} = W_{p(k)} + \eta * e * u_{p(k)} \quad (7)$$

收敛系数 η 决定了收敛的比率与估计的精确度, 经验值范围为 $0 \leq \eta \leq 1$, η 越大, 收敛率越快, 但精确度差。在适当的动态响应下, $\eta = 0.3$ 时, 能获得较高的准确性。三相参考电源电流相对应的负载电流正序成分关系如下:

$$\begin{cases} i_{sa}^* = W_p^+ u_{pa} \\ i_{sb}^* = W_p^+ u_{pb} \\ i_{sc}^* = W_p^+ u_{pc} \\ W_p^+ = (W_{pa}^+ + W_{pb}^+ + W_{pc}^+) / 3 \end{cases} \quad (8)$$

W_p^+ 是一个平均值, 有利于消除电流中的不平衡成分。 i_{sa}^* , i_{sb}^* , i_{sc}^* 作为补偿电流的指令电流, 传送给改进型无差拍电流控制器, 控制电源电流跟踪参考电流。改进型无差拍电流控制器产生开关信号驱动 IGBT, 使补偿后的电源电流接近于正弦电流。

3 Matlab 仿真分析

在配网系统中, D-STATCOM 的 Matlab/Simulink 仿真模型如图 4 所示, 系统由变压器低压三相三线制电网系统、非线性负载和 D-STATCOM 的指令电流检测器及输出电流控制器构成。指令电流检测子模块分别采用 FBD 法和自适应方法, 子模块如图 5 所示。通过 Matlab/Simulink 仿真得到的电网电压、电网电流、D-STATCOM 输出电流、负载电流和直流母线电压如图 6 中(a)、(b)所示。仿真运

行 1 s 时, 负载电流在 0.005 s 内从 150 A 变化到 500 A 的情况。当指令电流检测算法采用 FBD 法时^[8], 输出电流约 16 ms 跟踪上负载电流的变化; 采用参考模型自适应法时, 输出电流仅约 8 ms 跟踪上负载电流的变化。由此可以看出, 指令电流检测算法采用参考模型自适应法时, D-STATCOM 补偿的动态响应快, 动态性能最好。

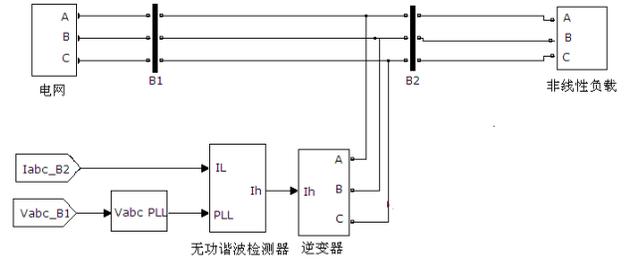


图 4 D-STATCOM 仿真模型

Fig.4 MATLAB based model of D-STATCOM

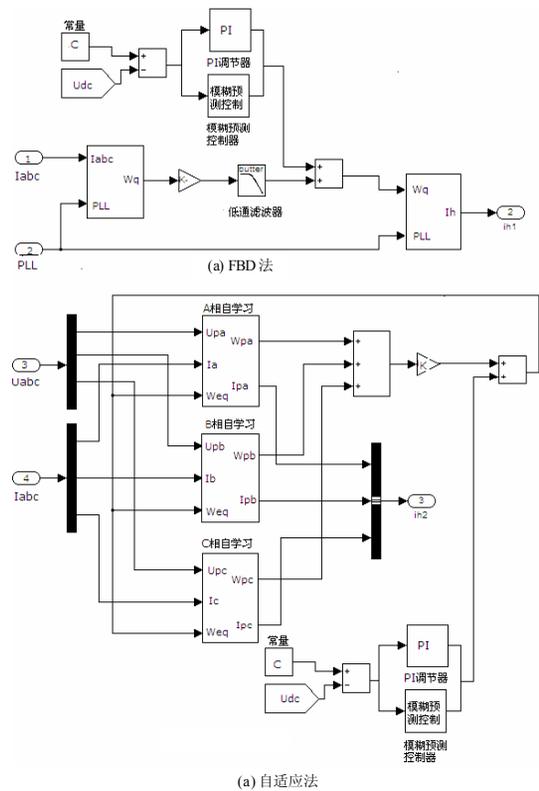


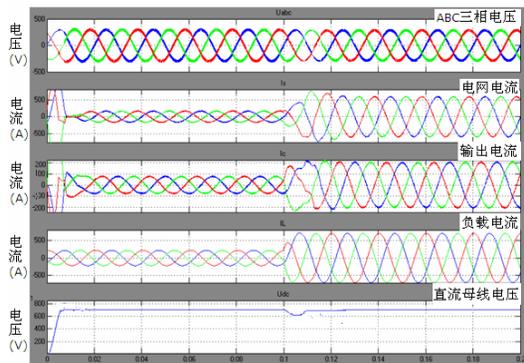
图 5 指令电流检测算法仿真子模块

Fig. 5 MATLAB-based model of current extraction

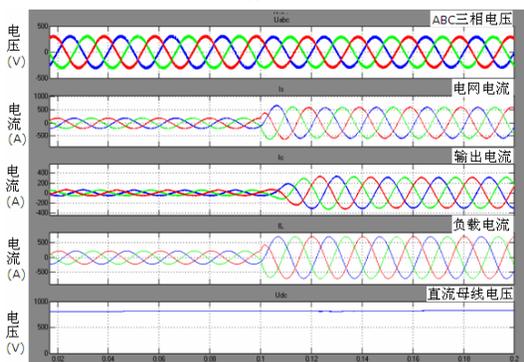
4 D-STATCOM 现场工程应用

并联型 D-STATCOM 装置, 采用自适应电流检测算法, 运用直流母线电压复合控制和改进型无差拍控制算法, 其结构如图 1 所示, 装置的额定补偿容量为 110 kvar。该装置应用于某容量 400 kVA 变

压器，其主要负载为冲床（冲击性负荷），负载电流



(a) FBD法



(b) 自适应方法

图 6 D-STATCOM 动态性能仿真图形

Fig. 6 Simulative figure of dynamic performance of D-STATCOM

在 500 A 到 80 A 之间变化，现场运行时，用高压电压探头测量直流母线电压，用 2 个电流钳分别测量 A 相负载电流和 D-STATCOM 的 A 相输出电流，波形如图 7 所示，其中绿色波形表示直流母线电压，蓝色波形为负载 A 相电流波形，而橙色波形为 D-STATCOM 输出的补偿电流波形。

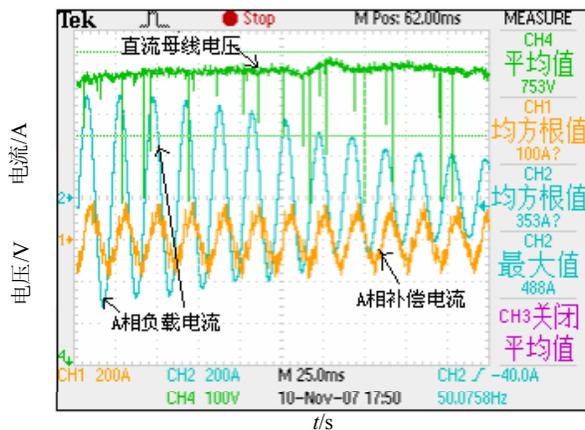


图 7 D-STATCOM 的动态响应图

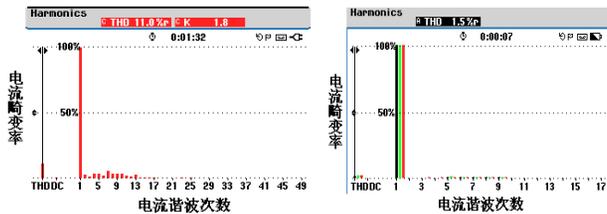
Fig.7 Dynamic performance of D-STATCOM

从图 7 可知 D-STATCOM 设备输出的补偿电流能在 10 ms 左右的时间能迅速跟踪上负载电流的动态变化，动态全响应时间约为 10 ms。

功率和电能					功率和电能				
FULL					FULL				
	A	B	C	Total		A	B	C	Total
kW	29.8	36.8	30.7	97.3	kW	33.6	33.5	34.5	101.6
kVAR	53.0	55.5	48.9	157.6	kVAR	33.8	33.7	34.9	102.4
kVARR	43.8	41.5	38.1	123.3	kVARR	3.1	4.2	5.3	12.7
PF	0.56	0.66	0.63	0.62	PF	1.00	0.99	0.99	0.99
Cos ϕ	0.56	0.66	0.63	0.62	Cos ϕ	1.00	1.00	1.00	1.00
Rms	224	236	207		Rms	145	145	149	
	A	B	C			A	B	C	
U _{rms}	236.5	235.1	236.6		U _{rms}	232.9	232.9	234.1	

a) 补偿前功率因数

b) 补偿后功率因数



c) 补偿前电流畸变率

d) 补偿后电流畸变率

图 8 补偿前后电网侧电能质量对比图

Fig. 8 Contrastive figure of net power quality of D-STATCOM before and after compensation

运用 Fluke 公司的电能质量分析仪 Fluke434 记录现场应用波形，如图 8 所示。图 8 为 D-STATCOM 装置未运行时，电网侧功率因数为 0.62、无功功率为 123.3 kvar，电流畸变率为 11%，主要集中在 2、4、5、7、9、11、13 次谐波，A/B/C 三相电流为 224/236/207 A；当 D-STATCOM 对负载电流进行无功补偿、有源滤波和三相不平衡补偿时，电网侧功率因数为 0.99、电流畸变率为 1.5%、A/B/C 三相电流为 145/145/149 A；冲击性负荷的无功功率、电流谐波和三相不平衡得有效的治理，改善了电网的电能质量。

该配电所以前是用投切式电容柜进行无功补偿，由于电流变化太快，投切式电容柜跟不上无功电流的变化，存在无功功率过补或欠补，电容器系统发生谐振现象，使电容器常烧坏，电网侧的月平均功率因数约为 0.75，达不到供电局的用电要求。投入 D-STATCOM 装置运行近 8 个月，月平均功率因数均在 0.95 以上，谐波畸变率符合国标 B-14549-93 要求，完全达到供电局对用户的用电需求。

5 结论

Matlab/Simulink 仿真分析了 FBD 法和参考模型自适应方法均为 D-STATCOM 的指令电流检测有效算法，参考模型自适应指令电流检测法是一种在

线的自调节算法, 动态响应快, 适用于冲击性负荷的无功补偿、三相不平衡补偿和有源滤波。D-STATCOM 现场工程应用中良好的补偿效果, 说明了自适应控制算法的动态性、稳定性和实用性。

参考文献

- [1] 王玉斌, 吕燕, 等. 三相电压不对称时谐波和无功电流的准确检测新方法[J]. 继电器, 2006, 34(18): 47-49.
WANG Yu-bin, Lü Yan, et al. New precision detection method of harmonics and reactive current under a symmetrical three-phase voltages[J]. Relay, 2006, 34(18): 47-49.
- [2] Herrera R S, Salmeron P, Kim H. Instantaneous reactive power theory applied to active power filter compensation: different approaches, assessment, and experimental results[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2008, 55(1): 184-196.
- [3] 刘亮, 邓名高, 欧阳红林. 配网动态无功补偿器的研究与应用[J]. 电力电子技术, 2009, 43 (4): 1-3.
LIU Liang, DENG Ming-gao, OUYANG Hong-lin. Research and application of distribution static compensator[J]. Power Electronics, 2009, 43 (4): 1-3.
- [4] Singh B, Verma V. Selective compensation of power-quality problems through active power filter by current decomposition[J]. IEEE Trans on Power Del, 2008, 23(2): 792-799.
- [5] Bhim Singh, Jitendra Solanki. A comparison of control algorithms for DSTATCOM[J]. IEEE Transactions on

Industrial Electronics, 2009, 56(7): 2738-2745.

- [6] Divan D M, Bhattacharya S, Banerjee B. Synchronous frame harmonic isolator using active series filter[C]. // Proc Eur Power Electron Conf, 1991: 3030-3035.
- [7] 袁旭龙, 王林虎. 自适应动态预测变电站电压无功模糊控制系统的研究[J]. 继电器, 2005, 33 (8): 41-43.
YUAN Xu-long, WANG Lin-hu. Study of reactive power fuzzy control system in substation based on adaptive dynamic prediction[J]. Relay, 2005, 33 (8): 41-43.
- [8] 徐琳, 韩杨, 云伟俊. 工厂配电系统电能质量仿真与治理方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (17): 38-42.
XU Lin, HAN Yang, YUN Wei-jun. Research on power quality simulation and enhancement scheme of the distribution system of factory[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (17): 38-42.

收稿日期: 2010-03-22; 修回日期: 2010-05-31

作者简介:

刘亮(1976-), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向为电力电子技术和控制理论的应用研究; E-mail: ann_0821@163.com

邓名高(1974-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用;

欧阳红林(1965-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为电力电子技术和电气节能。

(上接第 114 页 continued from page 114)

- [22] 沃尔特·恩德斯. 应用计量经济学[M]. 杜江, 谢志超, 译. 北京: 高等教育出版社, 2006.
Walter Enders, Applied econometrics time series[M]. DU Jiang, XIE Zhi-chao, trans. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [23] 王承煦, 张源. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
WANG Cheng-xu, ZHANG Yuan. Wind power generation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.

收稿日期: 2010-03-22; 修回日期: 2010-05-06

作者简介:

周晖(1964-), 女, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事电力负荷预测、电力系统调度与运行, 电力市场, 风电接入等方面的研究; E-mail: hzhou@bjtu.edu.cn

方江晓(1986-), 男, 硕士, 主要从事风电预测, 及风电接入的研究;

黄梅(1959-), 女, 研究员, 硕士生导师, 主要从事电力系统负荷建模, 继电保护与新能源研究。

作者声明

发表在本刊 2010 年 38 卷第 17 期的文章“自适应模糊支持向量机邻近增量算法在变压器故障诊断中的应用”, 系第一作者博士入校前的投稿, 未经导师和学校同意, 擅自挂名导师和学校, 且论文非第一作者所做工作, 经导师核实和申请, 该论文予以撤销, 并对原作者、导师及相关人员造成的伤害表示歉意。

特此声明。