

## 基于瞬时功率平衡和负序前馈控制的 DSTATCOM 电压控制策略方法

唐杰<sup>1,2</sup>, 罗安<sup>2</sup>, 盘宏斌<sup>2</sup>, 王跃球<sup>1</sup>, 赵伟<sup>2</sup>

(1. 邵阳学院电气工程系, 湖南 邵阳 422400; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 配电静止同步补偿器(DSTATCOM)通过向公共连接点注入无功功率可以调节公共连接点的电压,使之满足电压合格的要求。笔者首先根据 DSTATCOM 系统中的瞬时功率平衡理论推导出了 DSTATCOM 用于控制电压时的直接电压控制策略。在该控制策略中,无需电流检测电路,跟传统的串级控制相比较具有控制简单、响应速度快等优点。然后针对电网电压不平衡对 DSTATCOM 的影响,在基于瞬时功率平衡的直接电压控制的基础上,引入了负序电压的前馈控制策略,避免了 DSTATCOM 因电网电压不平衡造成的过流而退出运行。理论分析和仿真结果证明了笔者所提控制方法的正确性和有效性,该控制策略对 DSTATCOM 装置的实际开发有很好的借鉴作用。

**关键词:** 配电静止同步补偿器; 电压调节; 负序前馈控制; 瞬时功率

中图分类号: TM933.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)05-0392-03

### A Voltage Control Strategy for DSTATCOM Based on Balance of Instantaneous Power and Negative Sequence Feedforward Control

TANG Jie<sup>1,2</sup>, LUO An<sup>2</sup>, PAN Hong-bin<sup>2</sup>, WANG Yue-qiu<sup>1</sup>, ZHAO Wei<sup>2</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 422400, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The DSTATCOM regulates the voltage of the common coupling point (PCC) by injecting reactive power to it for meeting the requirement of voltage. Based on the balance of the instantaneous power of the DSTATCOM system, a direct output voltage control strategy for voltage control is proposed without current detection circuit. Compared with the cascade control strategy, the proposed one has the merits of simple structure and fast response time. On the basis of direct voltage control, the negative sequence voltage feedforward control is introduced to overcome the overcurrent of DSTATCOM when the main voltage is unbalanced. The effectivity and validity of the present control strategy is verified by the theoretic analysis and digital simulation. The control strategy presented in this paper can be used in development of DSTATCOM.

**Key words:** distribution static synchronous compensator; voltage regulation; negative sequence feedforward control; instantaneous power

## 0 引言

配电静止同步补偿器(DSTATCOM)是一种重要的用户电力装置。在配电网中,DSTATCOM能有效解决电压波动、电压暂降、电压不平衡、谐波污染等多种电能质量问题<sup>[1-5]</sup>,因此成为当前电气工程领域研究的热点之一。

笔者重点论述 DSTATCOM 用于维持接入点电压为给定电压值的控制策略。DSTATCOM 通过向公

共连接点注入无功功率可以调节公共连接点的电压,使之满足电压合格的要求。不少文献报道了 DSTATCOM 的电压控制策略。文[6-8]采用了电压外环、电流内环的串级控制策略,但由于控制系统中嵌入了多个 PI 调节器,使得控制器的设计比较困难。文[9,10]则通过建立 DSTATCOM 的状态方程,应用多变量控制理论设计 DSTATCOM 的电压控制器。其中文[9]采用了在工作点处近似线性化的方法,然而当系统运行状态发生变化时控制器的性能会受到影响。文[10]也存在类似的问题。因此研究寻求一种容

收稿日期:2007-09-05; 修回日期:2008-04-02

基金项目:湖南省教育厅优秀青年项目(07B068);湖南省自然科学基金资助项目(07JJ6081)。

作者简介:唐杰(1975-),男,湖南省武冈县人,博士,副教授,研究方向为电力系统谐波抑制和无功功率补偿。

易实现、性能优良的控制策略具有重要的意义。

文[11]根据 DSTATCOM 系统中的瞬时功率平衡理论,提出了 DSTATCOM 的直接电压控制策略。在这种控制策略中,无需电流互感器和电流检测电路,使得控制变得简单,响应速度加快。但该文献并没有考虑电网电压不平衡对 DSTATCOM 的影响。事实上,当电网电压不对称甚至严重不对称时,会给 DSTATCOM 装置带来不利的影响,主要表现在两个方面:一是负序电压对于采用对称调制的 DSTATCOM 装置来说相当于短路,因此装置极易产生过流而退出运行,而此时恰好是系统需要 DSTATCOM 来提供无功或电压支撑的时候;二是电网中的负序电压会在直流侧电容上产生 2 倍频的电压波动,进而会导致 DSTATCOM 输出电流中含有 3 次谐波电流。因此,很有必要采用不对称控制策略来消除电网电压不平衡时给装置带来的不良影响。笔者采用面向系统的不对称控制方法,即利用 DSTATCOM 产生一个与电网电压负序大小相等的电压来抵消电网电压中的负序分量(负序电压前馈控制)。仿真结果证明了所提出的控制策略的正确性和有效性。笔者的电压控制策略对 DSTATCOM 实际装置的开发具有很好的借鉴作用。

### 1 DSTATCOM 中的瞬时功率平衡及直接电压控制的提出

DSTATCOM 接入系统的单相等效电路见图 1。图 1 中,DSTATCOM 采用三相电压型逆变器拓扑,直流侧电容为 DSTATCOM 提供直流电压支撑。DSTATCOM 所接入的配电系统用其戴维南等效电路表示。 $R_f$  和  $L_f$  表示连接变压器和滤波器的等效电阻和电抗。DSTATCOM 逆变器输出电压为  $e$ ,装置接入点电压用  $u_{PCC}$  表示。

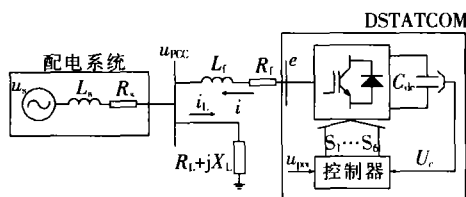


图 1 DSTATCOM 接入系统的单相等效电路

下面将利用瞬时功率平衡理论来推导出 DSTATCOM 的直接电压控制策略[11]。

根据功率平衡原理,逆变器输出的功率( $P_e + jQ_e$ )应等于注入系统的功率( $P_o + jQ_o$ )和耦合变压器及滤波器等效电阻、电抗消耗的功率( $P_f + jQ_f$ )之和,即

$$P_e = P_o + P_f \quad (1)$$

$$Q_e = Q_o + Q_f \quad (2)$$

设三相电网电压对称,在两相同步旋转坐标中,由瞬时功率理论可得[12]

$$P_e = 3/2(e_d i_d + e_q i_q) \quad (3)$$

$$Q_e = 3/2(e_q i_d - e_d i_q) \quad (4)$$

为了分析方便,选择同步旋转坐标系的  $d$  轴与公共连接点(PCC)电压矢量  $u_{PCC}$  重合,并设电压矢量的模为  $u$ 。于是可得

$$u_d = u \quad (5)$$

$$u_q = 0 \quad (6)$$

所以

$$P_o = 3/2(u_d i_d) = 3/2(u i_d) \quad (7)$$

$$Q_o = -3/2(u_d i_q) = -3/2(u i_q) \quad (8)$$

而耦合变压器和滤波器消耗的功率为

$$P_f = 3/2(i^2 R_f) = 3/2(i_d^2 + i_q^2) R_f \quad (9)$$

$$Q_f = 3/2(i^2 \omega L_f) = 3/2(i_d^2 + i_q^2) \omega L_f \quad (10)$$

将以上各式代入功率平衡式(1)、(2)可得

$$e_d = R_f i_d - \omega L_f i_q + u \quad (11)$$

$$e_q = R_f i_q - \omega L_f i_d \quad (12)$$

显然,式(11)、(12)实现了在  $dq0$  坐标系中电流  $i_d, i_q$  到电压  $e_d, e_q$  的转换。如果以  $i_d, i_q$  作为指令电流,那么  $e_d, e_q$  就是 DSTATCOM 逆变器要输出的指令电压。式(11)、(12)还可用框图表示,见图 2。可见,从电流指令到电压指令的转换关系无需电流调节器,跟传统的电压外环、电流内环的控制策略相比具有优越性。

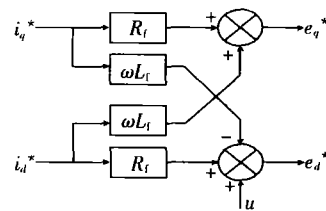


图 2 电流-电压转换原理图

根据 DSTATCOM 的补偿目的,即接入点电压和直流侧电容电压,可以得到采用 PI 控制时配电静止同步补偿器的控制原理图,见图 3。

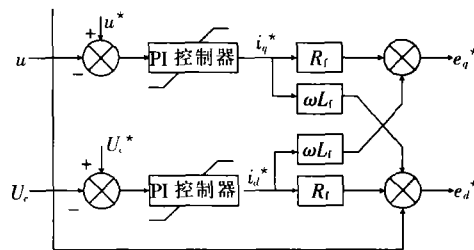


图 3 DSTATCOM 直接电压控制框图

图 3 中,接入点电压指令值与实际测量值的误差经 PI 调节后形成无功指令电流信号  $i_q^*$ ,直流侧电容电压指令值与实际测量值的误差经 PI 调节后形成有功指令电流信号  $i_d^*$ 。无功指令电流信号  $i_q^*$ 、有功指令电流信号  $i_d^*$  经电流/电压转换后,形成电压指令信号  $e_q^*$  和  $e_d^*$ 。 $e_q^*$  和  $e_d^*$  作为调制信号产生 PWM 驱动信号。

跟传统的 DSTATCOM 用于控制电压的串级双闭环控制策略相比,图 3 所示的控制方式省去了电流内环,为电压控制器的设计带来了方便,而且装置的响应速度也得以提高。但在电网电压不对称的情况下, DSTATCOM 装置的性能会受到影响 [12,13],甚至会因为功率开关器件过流而导致 DSTATCOM 装置退出运行。因此,很有必要研究 DSTATCOM 在电网电压不平衡条件下的控制策略,以提高 DSTATCOM 装置在电网电压不平衡条件下的生存能力。为了达到这一目的,笔者采用了负序前馈的电压控制策略,下面将予以详细论述。

### 2 DSTATCOM 的负序前馈控制

在上述基于瞬时无功功率平衡的 DSTATCOM 直接电压控制的基础上,为提高 DSTATCOM 装置在电网电压不平衡条件下的生存能力,引入了负序电压的前馈控制。负序前馈控制的基本思想是利用 DSTATCOM 产生一个与电网电压负序相等的电压来抵消电网电压中的负序。控制系统框图见图 4。

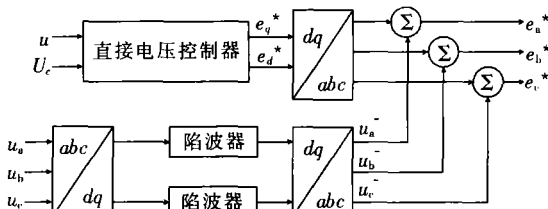


图 4 负序电压前馈控制框图

图 4 中,负序电压提取电路采用顺时针旋转坐标变换方法,电网电压中的负序分量经过变换后变成直流量,而正序电压经变换后变成交流量。变换后的直流量和交流量经 100 Hz 的陷波器后可以得到电网电压中对应的负序分量,负序分量经顺时针旋转反变换后叠加到直接电压控制器的输出上,共同形成 DSTATCOM 逆变器的输出指令电压。

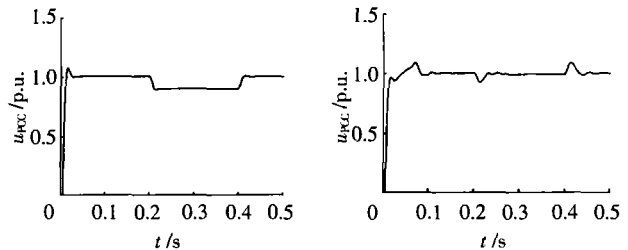
### 3 仿真研究

为了验证笔者所提方法的正确性与有效性,对上述控制策略进行了仿真研究,并给出了仿真波形。系统仿真参数如下:系统电压为 380 V,频率为 50 Hz,直流侧电容量为 2 200  $\mu$ F,直流侧电容电压为 500 V,SPWM 载波频率为 10 kHz,耦合变压器和滤波器等效电感为 5 mH;等效电阻为 0.2  $\Omega$ 。PI 控制器参数为:公共连接点电压控制器参数为 5 mH,直流侧电容电压控制器参数为 0.2  $\Omega$ 。

#### 3.1 电网电压平衡情况下的仿真结果

当电网电压平衡时, DSTATCOM 采用基于瞬时无功功率平衡的直接电压控制策略,控制器框图见图 3。在仿真过程中,为了模拟公共连接点电压的下降,在

$t=0.2$  s 时突加了无功负荷,在  $t=0.3$  s 时负荷恢复正常。在没有 DSTATCOM 补偿的情况下公共连接点的电压响应曲线见图 5(a)(图中以标么值表示)。可见,由于无功负荷的突增,引起了 PCC 处电压的下降,很有必要对电压进行补偿。有 DSTATCOM 补偿时公共连接点处的电压响应曲线见图 5(b)。

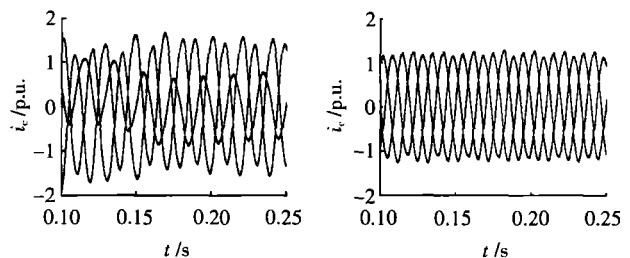


(a)无 DSTATCOM 补偿时 (b)有 DSTATCOM 补偿时  
图 5 无、有 DSTATCOM 补偿时公共连接点的电压响应曲线

从图 5(b)中可以看出,当 DSTATCOM 工作时,电压得到了很好的补偿,这说明采用基于瞬时无功功率平衡的直接电压控制策略是有效的。

#### 3.2 电网电压不平衡情况下的仿真结果

当电网电压不平衡时, DSTATCOM 采用基于瞬时无功功率平衡的直接电压控制和负序前馈相结合的控制策略,控制器框图见图 4。仿真过程中在 A 相串入一个电抗器来模拟电网电压的不平衡。在电网电压不平衡情况下重点研究 DSTATCOM 输出电流,考查在没有负序前馈控制和引入负序前馈后 DSTATCOM 的输出电流。图 6(a)、(b)给出了电网电压不平衡情况下无、有负序前馈控制时 DSTATCOM 的输出电流波形。



(a)无负序前馈控制时 (b)有负序前馈控制时  
图 6 无、有负序前馈控制时的电流波形

从图 6(a)、(b)可以看出,采用负序前馈控制后, DSTATCOM 的输出电流对称度得到明显改善,且输出电流的最大幅值也比没有采用负序前馈控制时的电流幅值小,这样能在电网电压不平衡情况有效地抑制 DSTATCOM 的过流,从而提高 DSTATCOM 在电网电压不平衡情况下的生存能力。

### 4 结语

配电静止同步补偿器通过向公共连接点注入无功功率可以调节公共连接点的电压,使之满足电压合格的要求。根据 DSTATCOM 系 (下转第 398 页)

的一是挥发掉上次进样后注射器内的残留，二是防止抽样后气体组分在注射器内凝结。另外，在用注射器从顶空瓶中抽取气体到向色谱仪注这一过程中，动作要迅速，以避免气体组成发生变化。

(5)由于静态顶空色谱法是一种间接分析法，所以，实验条件应采用平衡的原则，即在标准和样品测定时要保持实验条件的一致性(包括方法、仪器、操作条件等) 配制和稀释标准溶液所用的新变压器油应与试样有相同或相似的基质，而且在使用前一定要检查有无丙酮空白值，必要时给予扣除。另外还要检查实验室空气中有无丙酮空白值，以保证样品中微量丙酮测定的准确性。

#### 4 结语

(1)笔者建立了顶空气相色谱法测定变压器油中微量丙酮的方法。该方法简单、快速、灵敏、测定结果可靠。方法的检出限为 0.036 mg/L, 相对标准偏差为 4.2%, 平均回收率为 101.5%。完全满足对变压器油样中微量丙酮的测定要求。

(2)经过一年多时间对方法的考察和对陕西省不同地区、不同运行状态、不同批次的 75 个变压器油样中微量丙酮的验证测定，其体积分数范围

为 0~1.44 mg/L, 证实方法稳定, 测定结果良好, 可用于变压器油样中微量丙酮的测定。建议将其测定结果通过与电气试验等其它项目指标值有机结合, 进行综合分析判断, 以建立油中丙酮体积分数与变压器绝缘老化之间的关系。从而对变压器进行实时运行状态评估和绝缘老化程度、故障种类、程度、部位及发展趋势作出有效的诊断。

#### 参考文献:

- [1] DL/T 984-2005. 油浸式变压器绝缘老化判断导则[S].
- [2] 曾庆辉. 浅谈变压器油的气相色谱分析 [J]. 地方电力管理, 2002(10): 48-49.
- [3] 陈玉峰. 高效液相色谱法分析变压器油中 C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O<sub>4</sub>[J]. 高电压技术, 2001, 27(2): 69-70.
- [4] 赵景红. 改变相比/顶空气相色谱法测定变压器油中溶解气体的分配常数[J]. 色谱, 2004, 22(3): 193-196.
- [5] 李宁先. 变压器油中气体色谱分析方法和仪器发展现状[J]. 变压器, 2003, 40(8): 21-23
- [6] 川上惠美(日). 用油中丙酮含量来诊断开放式变压器的残余寿命[J]. 电气现场技术, 1998(3): 15-18.
- [7] 月岗淑郎(日). 变压器的老化诊断[J]. 电气现场技术, 1997(5): 23-27.
- [8] 张立君. 应用固相萃取技术测定磷脂中丙酮的残留量 [J]. 化学工程师, 2004, (5): 45-46.
- [9] GB 5009.37. 食用植物油卫生标准的分析方法[S].

(上接第 394 页)

统中的功率平衡理论, 推导出了 DSTATCOM 直接电压控制的电流-电压转换关系, 实现了 DSTATCOM 的无电流传感器控制, 且 DSTATCOM 的响应速度也得以提高。针对在电网电压不平衡情况下 DSTATCOM 的过流问题, 笔者提出了基于瞬时功率平衡的直接电压控制和负序前馈控制的电压控制策略。仿真结果表明, 提出的控制策略达到了预期效果, 在实现电压调节和抵制不平衡方面具有优越性。

#### 参考文献:

- [1] WANG P, JENKINW N, BOLLEN M H J. Experimental Investigation of Voltage Sag Mitigation by an Advanced Static Var Compensator [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(4): 1461-1467
- [2] SENSARMA P S, PADIYAR K R, RAMANARAYANAN V. Analysis and Performance Evaluation of a Distribution STATCOM for Compensating Voltage Fluctuations [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2001, 16(2): 259-264.
- [3] 袁佳歆, 陈柏超, 万黎, 等. 利用配电网静止无功补偿器改善电网电能质量的方法[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 81-84.
- [4] 李旷, 刘进军, 魏标, 等. 静止无功发生器补偿电网电压不平衡的控制及其优化方法 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 58-63.
- [5] LEE W C, LEE T K, HYUN D S. A Three-phase Parallel Active Power Filter Operating with PCC Voltage Compensation with Consideration for an Unbalanced Load[J]. IEEE Tran. on

- Power Electronics, 2002, 17(5): 807-814.
- [6] FREITAS W, MORELATO A, XU W, et al. Impacts of AC Generators and DSTATCOM Devices on the Dynamic Performance of Distribution System [J]. IEEE Tran. On Power Delivery, 2005, 20(2): 1493-1501.
- [7] SUN J, CZARKOWSKI D, ZABAR Z. Voltage Flicker Mitigation Using PWM Based Distribution STATCOM [C]// Power Engineering Society Summer Meeting, 2002: 616-621.
- [8] PETER W L. A Benchmark System for Simulation of the D-STATCOM [C]// Power Engineering Society Winter Meeting, 2002: 496-498.
- [9] LEHN P W, IRAVANI M R. Experimental Evaluation of STATCOM Closed Loop Dynamics [J]. IEEE Tran. on Power Delivery, 1998, 13(4): 1378-1384.
- [10] PRANESH R, CROW M L, YANG Zhi-ping. STATCOM Control for Power System Voltage Control Applications [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2000, 15(4): 1311-1317.
- [11] CHEN W L, HSU Y Y. Direct Output Voltage Control of a Static Synchronous Compensator Using Current Sensorless d-q Vector-based Power Balancing Scheme [C]// Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003: 545-549.
- [12] 马晓军, 姜齐荣, 王仲鸿, 等. 静止同步补偿器的分相不对称控制[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 52-56.
- [13] 魏文辉, 宋强, 腾乐天, 等. 基于反故障控制的链式 STATCOM 动态控制策略的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 19-24.