

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.05.023

电网电压存在谐波情况下 静止同步补偿器的前馈控制

杨承上, 陈辉明*, 王正仕

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 电网中的谐波会对静止同步补偿器(STATCOM)造成多方面的影响,包括补偿电流产生畸变,同时会引起交流侧和直流侧能量交换,导致直流侧母线电压波动,从而进一步加剧电流波形的恶化,给控制带来诸多困难。针对上述问题,指出了传统PI闭环控制策略在STATCOM应用中的不足之处,即系统抗干扰能力差,电流跟踪误差大,无法满足指标要求。在详细分析以上问题产生原因的基础上提出了前馈控制的方案,通过检测STATCOM并网接入点电压,将电网中所含谐波分量通过前馈网络引入控制系统,抑制了其对输出电流和直流母线电压的影响。研究表明,通过加入前馈控制提高了输出性能,电流波形接近正弦,母线电压波动减小,并且该系统具有良好的稳定性和动态性能。

关键词: 静止同步补偿器; 电网谐波; 比例-积分控制; 前馈控制

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)05-0610-04

Feed-forward control of STATCOM with harmonic voltage in power grid

YANG Cheng-shang, CHEN Hui-ming, WANG Zheng-shi

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the harmonic voltage in power grid influencing on the performance of static synchronous compensator(STATCOM), such as, the distortion of compensation current, the fluctuation of voltage across DC capacitor caused by energy alternation between STATCOM and grid, the shortcomings of the control based on PI close loop was analyzed, and bad capacity of resisting disturbance accompany with large error of current tracking was illustrated. Based on those problems, a novel feed-forward control method importing the voltage of PCC to STASCOM was proposed, restraining the impact of harmonic voltage in the power grid. The results indicate that the proposed control strategy enhances the feature of the STATCOM, making the out current be sine-wave, and reducing DC voltage ripple. And the system has good steady-state and dynamic performance.

Key words: static synchronous compensator (STATCOM); harmonic voltage; PI control; feed-forward control

0 引 言

电力系统中充斥着大量的无功功率和谐波电压,并且随着电力电子装置等非线性负载的逐渐增加,电网质量必然会进一步恶化。静止无功发生器(STATCOM)作为一种新型动态无功补偿装置,与传统无功补偿装置相比具有诸多优点:既可以补偿基波无功电

流,又可以抑制谐波电流;补偿范围广,既可补偿感性无功,又可补偿容性无功;可连续调节;响应速度快;控制精确;谐波含量低。

近年来,国内外很多学者从事STATCOM的研究,从现状看,大都集中在STATCOM并网接入点(PCC)三相电压平衡、不含谐波的理想情况下进行系统建模和控制。但在实际电网中,三相不平衡和含

收稿日期: 2012-12-26

作者简介: 杨承上(1987-),男,江苏徐州人,主要从事静止无功补偿方面的研究. E-mail: ziyu1987@yahoo.com.cn

通信联系人: 陈辉明,男,教授,硕士生导师. E-mail: huiming@zju.edu.cn

谐波的情况普遍存在,这些因素会给电网的锁相带来一定困难,更为棘手的是,它们会导致 STATCOM 输出电流的畸变,并且带来直流侧母线电压的波动,而这又会在输出电流上引起新的谐波分量。针对三相不平衡问题,目前已有大量研究,常用的方法是将电网三相电压进行正、负序分解,然后对正、负序分量分别进行控制^[1-2],已经可以取得很好的效果。但是针对电网电压中的谐波因素对 STATCOM 影响以及如何抑制其影响方面的研究则很少有涉及。

当电网发生畸变时,STATCOM 的补偿电流主要分两种,一种是仅补偿用户端产生的无功电流,使得电网电流与电压波形一致;另一种则从减小传输线功率损失的角度出发,将补偿电流控制为正弦波形^[3]。本研究所提及的分析和控制方案仅针对后一种。文献[4]采用开环响应时间常数分析法得出电网电压含谐波时在 STATCOM 直流侧母线电压会产生两个谐波电流分量,但根据其所建数学模型计算出的谐振条件和仿真结果略有差异。文献[5]采用开关函数法对电路的谐振条件及幅值和相位的关系进行了分析,但是并没有给出如何抑制或消除电网谐波分量影响的方案。

在以上研究的基础上,笔者分析电网电压所含谐波给 STATCOM 直流母线电压和输出电流带来的影响,提出引入三相电网电压进行前馈补偿控制的方案,使网侧对输出电流的影响可以降到很小,从而抑制电压谐波对输出电流波形的干扰。

1 电网含谐波对直流侧母线电压的影响

电网电压存在谐波时会引起直流母线侧的低频波动,波动水平和频率受电网所含的谐波幅值、频率和相序决定。鉴于电网中三相对称电网来说,三次谐波分量构成零序系统,并不影响 STATCOM 的工作,鉴于此,下面就以电网含五次负序谐波电压的情况作为分析条件。

STATCOM 拓扑结构图如图 1 所示^[6-7]。在忽略线路阻抗和变换器损耗的情况下,研究者可以将 STAT-

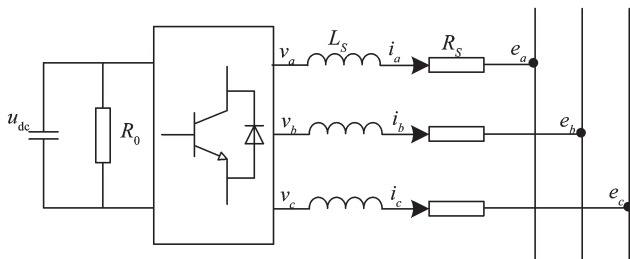


图1 STATCOM 拓扑结构图

COM 的输出等效为可控(幅值、相位)电压源。当补偿电流超前电网相位 90° 时,STATCOM 工作于容性区域,输出感性无功;当补偿电流滞后电网相位 90° 时,STATCOM 工作于感性区域,吸收感性无功。电网电压(e_a, e_b, e_c)和 STATCOM 输出电流(i_a, i_b, i_c)在 $d-q$ 坐标系下的表达式分别为^[8]:

$$e_{dq} = E_1 e^{j\alpha} + E_5 e^{j(-6\omega t + \chi)} \tag{1}$$

$$i_{dq} = I_1 e^{j\beta} + I_5 e^{j(-6\omega t + \delta)} \tag{2}$$

式中: E_1, E_5, I_1, I_5 —电压、电流的基波、五次谐波在旋转坐标系下的幅值; $\alpha, \beta, \chi, \delta$ —其相应的相角。

由式(1,2)可知,电网输入 STATCOM 的瞬时视在功率为:

$$S = -(p + jq) = -u_{dq} \cdot \overline{i_{dq}} = -(E_1 I_1 e^{j(\alpha-\beta)} + E_5 I_5 e^{j(\chi-\delta)}) - (E_1 I_5 e^{j(6\omega t + \alpha-\delta)} + E_5 I_1 e^{j(-6\omega t + \chi-\beta)}) \tag{3}$$

式中: $\overline{i_{dq}}$ — i_{dq} 的共轭复数。

从式(3)可以看出,当电网电压含谐波时,谐波电压和电流相互交叠使得 PCC 处流入 STATCOM 的瞬时功率中包含 6 次分量,由于开关器件和连接电抗上消耗的功率很小,可近似认为,网侧的波动功率全部流入直流侧电容,引起电容的不断充放电而造成母线电压的波动,其波动频率为 6 倍基波频率。

不仅如此,直流侧母线电压的波动还会使 STATCOM 交流输出侧产生其他谐波电流。6 倍基波频率的母线电压波动可以引发输出电流中产生 7 次正序谐波电流和 5 次负序谐波电流,它们在同步旋谐波坐标系中都是交流量,而非直流量。

2 电网含谐波对补偿电流的影响

电流控制是评价 STATCOM 性能的关键,也是系统控制的重点。本研究采用同步旋转坐标系下的 PI 控制,能够实现对直流分量的无静差跟踪,但是不能消除谐波引起的波动分量扰动的影响。

d 轴电流环控制框图如图 2 所示^[9-10]。加 PI 补偿网络后补偿电流的表达式为:

$$i_d = G_1(s) \cdot i_{dref} - G_2(s)e_d \tag{4}$$

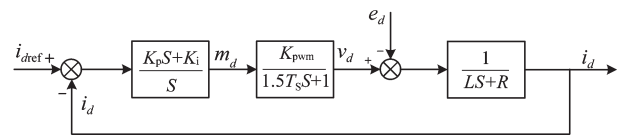


图2 d轴电流环控制框图

T_s —开关周期

其中:

$$G_1(s) = \frac{K_{pwm}(K_p s + K_i)}{1.5LT_s s^3 + (L + 1.5RT_s)s^2 + (R + K_{pwm}K_p)s + K_{pwm}K_i} \quad (5)$$

$$G_2(s) = \frac{1.5T_s s^2 + s}{1.5LT_s s^3 + (L + 1.5RT_s)s^2 + (R + K_{pwm}K_p)s + K_{pwm}K_i} \quad (6)$$

由式(4~6)可以看出, i_{dref} 为直流, $G_1(s)=1$, 前向通道传递函数的截止频率选取取得很高, i_d 能够实现对其准确快速跟踪^[11]。

电网谐波作为干扰, 在同步旋转坐标系下, 五次负序谐波分量的频率变为 300 Hz, 在 $s=j\omega=j2\pi \times 300$ 时, 考虑到电路实际参数, 近似有:

$$G_2(j\omega) \approx \frac{1}{K_{pwm}K_p} \quad (7)$$

出于系统稳定性和快速性的综合考虑, K_p 、 K_i 并不能取到无穷大, 所以 PCC 处谐波分量对电流环影响不为零, 电流跟踪误差一直存在系统中。

同样, PCC 点的谐波分量也会影响 Q 轴的输出电流。另外, 直流侧母线电压的波动会使得电压环的 PI 调节输出不再是直流, 而是在直流的基础上叠加了波动分量, 而这一结果又将作为 Q 轴无功电流的参考值 i_{qref} , 显然, PI 调节闭环的性质决定了输出电流 i_q 无法跟踪参考电流 i_{qref} , 如图 3 所示。

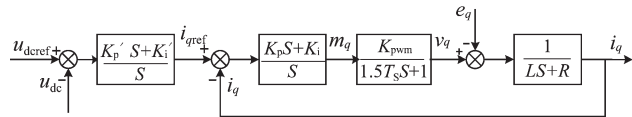


图 3 q 轴电流环控制框图

3 采用前馈控制策略抑制电压谐波的影响

为实现 STATCOM 在电网含谐波情况下依然具有良好的跟踪指令以及抵消扰动影响的能力, 本研究在系统中引入描述外部输入信号信息的前馈控制环节。

笔者通过电压霍尔元件取 PCC 点三相电网电压, 经截止频率较高的低通滤波器滤波后, 再经比例放大和旋转同步坐标变换后变为 e_d 、 e_q , 将之同 d 、 q 轴电流内环的 PI 调节器输出结果相加, 得到新的交流侧电压输出信号 v_d 、 v_q , 然后再经过反旋转同步坐标变换即可得到三相 PWM 控制信号。

引入前馈控制等于是 STSTCOM 三相桥臂的交流侧相应地复制了电网的信息, 这中间当然包括谐波, 使得 STSTCOM 输出一个和电网所含谐波幅值相同、相位一致的电压谐波分量, 谐波之间相互抵消, 交

流侧与电网电压的差值就仅仅是基波频率上的, 则流过连接电抗的电流只含有基波分量, 自然也就消除了电流中的谐波成分, 使得 D 、 Q 轴上直流量的控制得以顺利实现, 如图 4 所示。

前馈控制无需改变系统环路增益, 本身不形成闭环反馈回路, 不存在闭环稳定性问题, 因而也就不存在控制精度与稳定性矛盾。

但是, 即使将补偿电流控制成正弦波形, 且 $I_s=0$, 由式(3)可知, 由于电压谐波存在, 其与基波电流的乘积仍然会使得流入 STATCOM 的瞬时功率有波动, 相应地, 直流母线电压就会有波动。同时, 要维持直流侧的电压恒定, 抑制波动, 补偿电流中必须要有谐波分量。由此可见, 直流电压控制与交流侧电流控制目标二者之间是有矛盾的, 在设计时研究者只能将二者折中考虑, 以满足不同应用场合的需要。

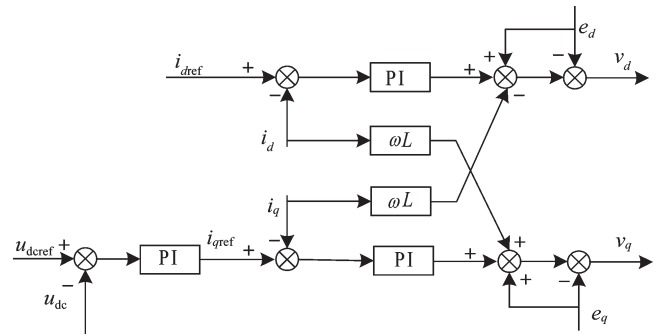


图 4 加入前馈环节后 STATCOM 系统 d 、 q 轴解耦控制框图

4 仿真与实验结果

为了验证上述方案的正确性和有效性, 本研究基于 Matlab 软件中的 Simulink 模块搭建仿真模型。根据上述分析, 在电网含谐的情况下, 笔者针对 STATCOM 系统有无前馈环节的情况分别做了仿真。仿真条件设置如表 1 所示。系统进入稳定状态后, 仿真结果如图 5、图 6 所示。

表 1 仿真参数设置

参数	设置值
直流母线电压/V	800
电网电压基波有效值/V	220
5 次谐波含量	1%
参考无功补偿电流有效值/A	10
补偿电流相位	超前 90°
连接电抗/mH	2.5
寄生电阻/ Ω	0.12
直流电容/ μ F	2 200
开关频率/kHz	7.5

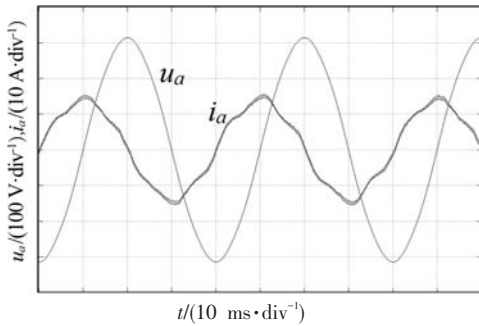


图5 未加前馈控制时电网电压、补偿电流仿真波形

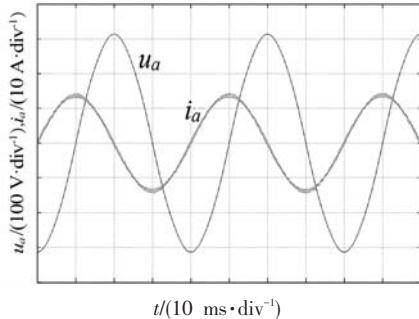


图6 加前馈控制时电网电压、补偿电流仿真波形

根据前文所述的前馈控制补偿方案,本研究基于TMS320F28335设计了一台补偿容量6.6 kVar的STATCOM实验样机,并在此基础上进行了无功补偿实验,实验结果如图7、图8所示。

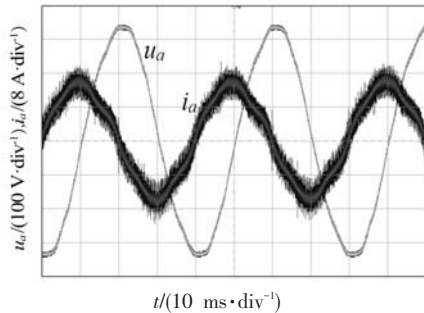


图7 未加前馈控制时电网电压、补偿电流实验波形

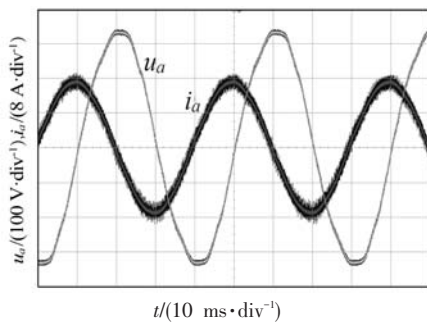


图8 加前馈控制时电网电压、补偿电流实验波形

由图5、图6及图7、图8所示的电压电流波形的对比可以看出,在系统加前馈环节后,补偿电流获得了明显的改善,这说明系统很好地抑制了电网谐波造成的电流畸变。

5 结束语

本研究分析了在基于理想三相电网情况下的建模和基于同步旋转坐标系下PI闭环控制的STATCOM在实际电网含有谐波情况下输出电流会产生畸变的原因,提出了采用前馈控制抑制电压谐波对STATCOM输出电流影响的方案。

仿真和实验结果证明,该方案较好地抑制了电网谐波带给STATCOM的各种不良影响,使得补偿电流效果大大改善。该方案具有良好的稳定性和快速性。

参考文献(References):

- [1] WANG Yue-qiu, TANG Jie, QIU Xiong-er. Analysis and Control of D-STATCOM under Unbalanced Voltage Condition [C] // Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC), 2011 International Conference on, 2011: 1623-1625.
- [2] HOCHGRAF C, LASSETER R H. Statcom controls for operation with unbalanced voltages [J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1998, 13(2): 538-544.
- [3] FU Qing, YANG Geng. A Novel Control Method for Active Power Filter Considering Harmonic Voltage in Power Source [C] // Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC'06, 37th IEEE, 2006: 1-6.
- [4] 沈冬, 姜齐荣, 韩英铎. 静止同步补偿器的标么化模型及开环响应时间常数分析 [J]. *电机工程学报*, 2000, 20(7): 56-61.
- [5] 同向前, 张新闻, 张岩燕. 电网电压畸变对STATCOM的影响分析 [C]. 第二届全国电能质量学术会议暨电能质量行业发展技术论坛论文集, 2011: 452-458.
- [6] 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.
- [7] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [8] DONG Shen, WANG Zhong-hong, CHEN J Y, et al. Harmonic resonance phenomena in STATCOM and relationship to parameters selection of passive components [J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2001, 16(1): 46-52.
- [9] 张兴, 张崇巍. PWM整流器及其控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [10] 赵国鹏, 刘进军, 王兆安. 并联型电能质量控制器电流控制误差的研究 [C]. 第十七届全国电源技术年会论文集, 2007: 56-59.
- [11] 胡雪峰, 王璐, 龚春英, 等. 并网逆变器的补偿控制技术 [J]. *高电压技术*, 2010, 36(12): 3084-3089.