

链式STATCOM控制策略的研究

链式静止同步补偿器 (STATCOM) 由于其优异的特性得到了广泛的关注, 首先阐述了载波移相SVPWM调制算法, 此算法具有直流母线电压利用率高、电流调节能力强等特点。针对直流电容电压不平衡问题, 提出一种三层控制方法, 并用仿真加以验证。搭建一套链式STATCOM装置, 将上述算法运用于其中, 采用无功、谐波共补的复合控制方案, 给出相应结构图, 实验结果表明该链式STATCOM不仅运行稳定可靠, 而且具备良好的无功补偿与谐波抑制效果。

何至源 秦永宽 何小炜 丁 峰/国网江西省电力公司宜春供电分公司

0 引言

随着社会经济的发展, 不断增长的工矿企业给电网带来了日益增多的无功消耗与谐波电流, 前者造成系统电压波动与偏差, 后者导致网内电流波形畸变, 可以将之统称为电能质量问题。较差的电能质量不仅会影响电网设备的正常运行, 同时还会增加线路损耗, 严重时甚至会影响到电力系统的稳定, 如何解决这一问题, 在负荷终端处对电能质量进行治理, 杜绝其对公网的影响是一个行之有效的方法。

最早的电能质量治理装置多由电力器件构成, 体积大、成本高、响应慢且补偿能力受限, 而静止同步补偿器 (STATCOM) 的出现是一大进步, 其基本原理就是调节并网端电压的相位与幅值来控制装置的输出电流, 对负荷进行动态无功补偿, 以维持系统末端电压稳定, 改善电力系统的动、静态性能, 具有体积小、响应快、调节平滑且补偿能力强等优点, 但传统STATCOM往往只具有单一的功能, 显然无法满足当今电

网电能质量综合治理的需求, 随着研究不断深入, 兼有无功补偿与谐波治理功能是STATCOM今后发展的重要趋势之一^[1]。

本文以链式STATCOM的控制策略为研究对象, 首先论述了链式结构的特点, 阐述了对应此结构一种调制性能更优异的载波移相SVPWM算法; 针对链式STATCOM中普遍存在的直流电容电压不平衡问题, 提出一种较为新颖三层控制方法, 最后给出无功、谐波共补的复合控制方案, 并通过仿真与实验证明采用上述控制策略的链式STATCOM具有良好的无功补偿与谐波抑制效果。

1 STATCOM主电路结构与载波移相SVPWM调制

STATCOM一般运用于电力系统中, 受限于功率器件的耐压、过电流能力, 要实现高设备容量与耐压等级, 装置主电路必须通过功率器件串联、多重化、多电平化等方法增压、扩容, 相比于其他结构, 链式电路将多个逆变H桥串联, 使同一相逆变桥输出电压叠加在一起, 不仅增加了输出相电压的电平数, 改善了其波形, 还提高了设备的容量。虽然功率器件较多, 但基本单元为全桥电路, 易于进行模块化生产与维护, 且各单元逆变桥之间相互独立, 加之冗余设计, 装置的可靠性很高^[2], 因此本文选取星形链式STATCOM为主电路, 主电路如图1所示。

由文献[3]可知, 在实际运用中, 对调制波错时采样即可实现载波相移, 目前使用较多的是载波移相SPWM调制。



何至源/工程师

关键词/Keywords

链式STATCOM ·
复合控制方案 ·
电容电压控制 ·

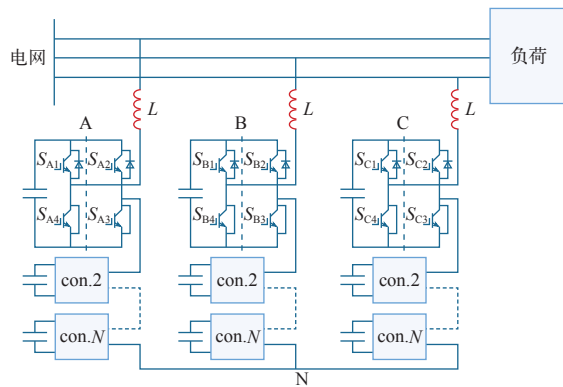


图1 链式STATCOM主电路图

而SVPWM本质是建立在规则采样基础上通过给定矢量合成目标矢量的PWM调制方法，所以在其中引入错时采样就能实现载波移相SVPWM调制。对三相电网系统中的电压进行离散化采样，则电压空间矢量可为

$$\begin{cases} U(t) = U_M e^{j\varphi(k)} \\ \varphi(k) = 2\pi f T_s k + \theta \end{cases}$$

式中， θ ($0 \leq \theta < 2\pi/k_c$) 为初始采样偏移角； T_s 为采样周期； $k=0, 1, \dots, k_c$ 。

在正常的SVPWM调制中，上式中的 θ 一般取值为0，当 k 从0变化到 k_c 时，空间矢量 $U(t)$ 就在复平面上形成一系列的离散分量，如图2a所示。而当 θ 不为0时，就能得到不同的采样点分布，如图2b所示。

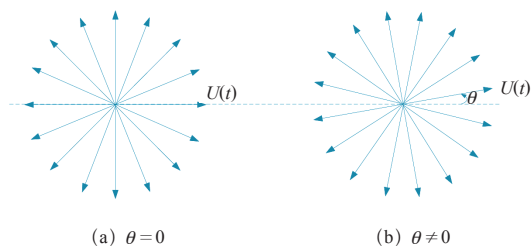
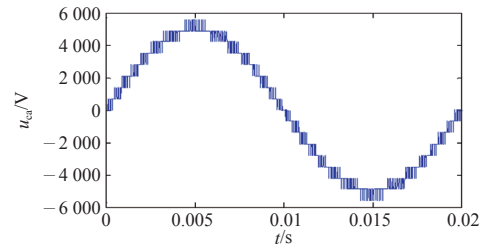


图2 离散化电压矢量

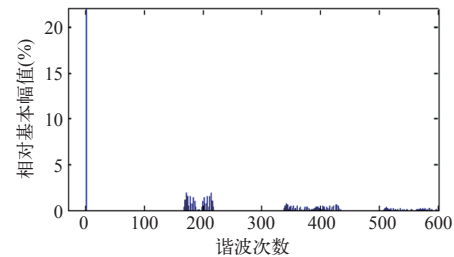
采用上述不同的 θ 角调制的变流器单元输出电压叠加，就能增加复平面内空间矢量的分布，提高电压幅值和等效开关频率，由此可知只要对每个变流单元的采样初始角进行修改就可以在由 N 个变流器串联而成的换流链中实现SVPWM调制效果。

为了对比及验证载波移相SVPWM调制算法，

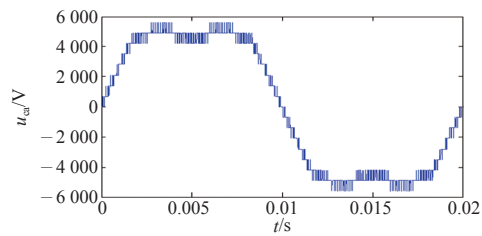
在Matlab仿真平台中进行仿真分析，每相H桥级联数为8，调制比为0.9，电网线电压有效值为6 000 V。图3为链式STATCOM分别采用载波移相SPWM调制和载波移相SVPWM调制时输出相电压 u_{ca} 及其频谱分析。



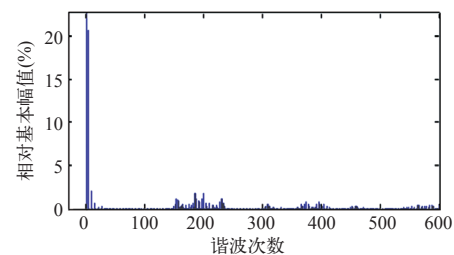
(a) 载波移相SPWM输出相电压波形



(b) 载波移相SPWM输出相电压频谱



(c) 载波移相SVPWM输出相电压波形



(d) 载波移相SVPWM输出相电压频谱

图3 载波移相SPWM、SVPWM仿真图

从图3可以看出采用两种调制技术输出相电压的电平数均为17 ($2N+1$)，输出相电压低次谐波主要集中在192次 ($2Nk_c$)，这表明装置等效开关频率提高了 $2N$ 倍，与理论相符。同时可以看出在相同的调制比下载波移相SVPWM的直流侧电压利用率比载波移相SPWM高出了15%，因此具有更强的电流调节能力，且易于数字化实现。

2 链式STATCOM控制策略与仿真验证

由上文可知,链式STATCOM每个H桥是相互独立的,在理想状态下,并不会出现电容电压不平衡的现象,然而在实际情况中,由于各H桥的损耗不同,之间的触发信号存在微小时差,装置在运行一段时间后就会出现各电容器有压差的情况,从而对交流侧的输出造成不良影响^[4]。针对此问题,已有文献提出了解决方法,大致可归纳为两类:外部交换法、自平衡法。前者经济性较差,目前仅运用在大功率STATCOM中;而自平衡法通过微调调制波相位来调节电容电压,硬件投入小,在中小容量链式STATCOM中应用广泛。

当前自平衡法大多是从控制单个电容电压着手,较少考虑到总体与相间电压平衡问题。一般认为,电容电压与其吸收的有功有关,由文献[5]可知,在实际电网中,由于三相并非完全对称,正、负序电压和电流的相互作用会造成STATCOM三桥臂之间有功功率不平衡,从而使得各阀组间存在压差,所以此时仅通过控制单个电容来稳定电压,效果往往难尽如人意。

基于这一情况,本文提出一种三层控制策略,即分别从整体、相间和相内三个方面控制直流电容电压:①总体控制采用电压外环电流内环模式,利用电流内环中的指令有功电流实现各电容电压的基本平衡;②将每相多个级联H桥等效为一级H桥单元,通过给定电容电压与单相电容电压均值的比较,来微调每一相调制波以平衡相间有功功率,从而达到各桥臂间电容总电压平衡;③根据自平衡原理,将相内各电容电压与给定电压比较,输出相应平衡控制量,最终使得三相每个电容电压均衡。

在Matlab中构建链式STATCOM仿真模型,采用复合控制策略,以无功补偿为主,兼具谐波治理功能,其中无功补偿控制结构采用基于小型号模型的电压外环电流前馈解耦内环控制结构,谐波治理采用分频控制^[6],重点对低次谐波进行补偿,本节中提出的三层直流电容电压控制框图如图4所示。

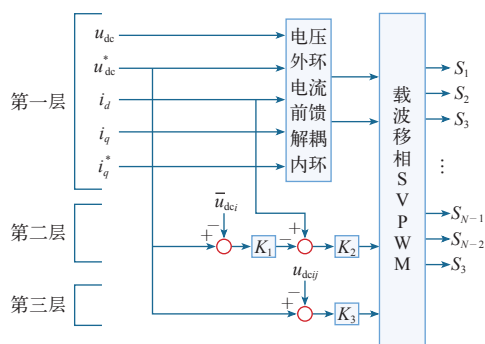
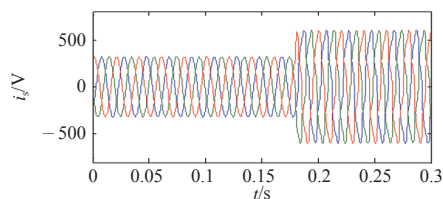
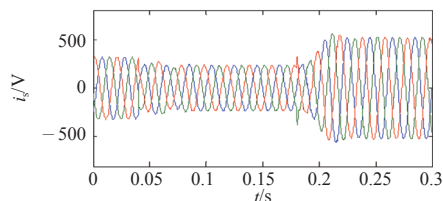


图4 链式STATCOM电容电压控制原理框图

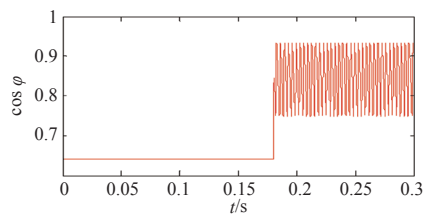
在仿真过程中,装置由半自励方式软起动,首先加入感性无功,让电网工作在低功率因数下,0.04 s时STATCOM投入运行,0.18 s再投入谐波源,由于仿真中不存在损耗等问题,所以也不会出现电容电压不平衡问题,下面仅给出补偿前后网侧电流、功率因数仿真图,如图5所示。



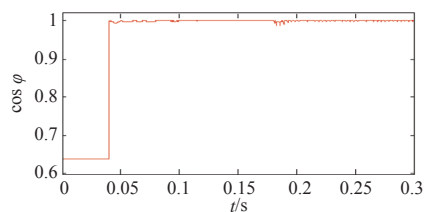
(a) 补偿前的网侧电流



(b) 补偿后的网侧电流



(c) 补偿前的功率因数



(d) 补偿后的功率因数

图5 仿真结果图

从图5可以看出装置并网补偿后,系统功率因数提高了,负荷给公网注入的低次谐波也得到了很好的抑制。

3 实验验证

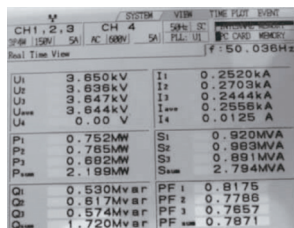
搭建一套链式STATCOM装置,此装置由启动柜、变流柜和测控柜组成,装置容量约为3 Mvar,主控板采用的是DSP+FPGA结构,其中DSP用于执行总控制策略,FPGA用于控制外围电路与输出开关脉冲信号,实物图如图6所示。



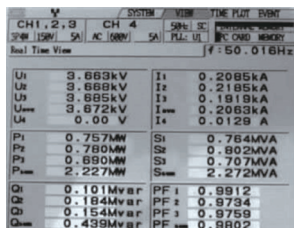
图6 装置实物图

经过测试与改造,此链式STATCOM装置已成功在某工矿企业变电站并网运行,STATCOM投入运行后现场实测图如图7所示。

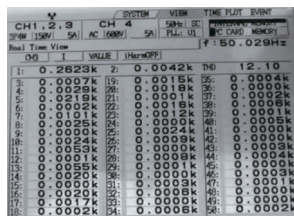
从图7可知,装置投入运行后,电网功率因数由0.78升高至0.99,电流谐波率小于5%,满足国家相关标准,各电容电压基本保持平衡,可见该链



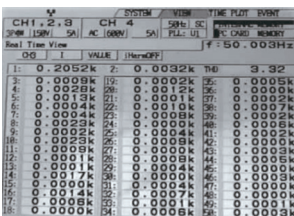
(a) 投入前功率因数



(b) 投入后功率因数



(c) 投入前网侧电流谐波率



(d) 投入后网侧电流谐波率

各相各链节电压			
项目	链节直流电压 (V)		
链节号	A相	B相	C相
1	693	718	703
2	699	698	691
3	698	708	708
4	695	702	702
5	692	708	693
6	709	692	714
7	697	694	692
8	708	695	697

(e) 直流电容电压

图7 现场运行情况图

式STATCOM运行稳定,具有良好的无功补偿、谐波抑制效果。

4 结束语

在供电质量要求不断增高的今天,对不合格电能有效治理显得尤其重要。本文主要讨论了链式STATCOM的控制策略,并通过仿真与实验证明了采用文中所提控制方法的链式STATCOM具有良好电能质量治理效果,具备广阔的实用性与经济价值。

参考文献

- [1] 姜齐荣,沈斐,韩英铎.现代电能质量控制技术[J].电力电子技术,2004,38(6):2-7.
- [2] 沈斐,王娅岚,刘文华,等.大容量STATCOM主电路结构的分析和比较[J].电力系统自动化,2003,27(4):59-65.
- [3] 袁志昌,宋强,刘文华.载波移相SPWM开关频率的选取[J].电力自动化设备,2004,29(8):37-40.
- [4] 耿俊成,刘文华,袁志昌.链式STATCOM电容电压不平衡现象研究[J].电力系统自动化,2003,27(16):53-57.
- [5] 胡应宏,任佳佳,王建赟,等.级联STATCOM阀组直流侧电压不平衡现象及原因分析[J].电力系统自动化,2011,35(21):96-99.
- [6] 范瑞祥,罗安,涂春鸣.并联混合型有源滤波器的分频控制方法研究[J].中国电机工程学报,2007,27(25):108-113.

(收稿日期:2015-09-09) EA