

基于级联式电压源逆变器的静止同步补偿电压控制器的设计

The Design of STATCOM Voltage Controller Based on Cascaded Multilevel

广东省石油化工建设集团公司 杜伟波

Gongdong Petrochemical Engineering Construction Group Corporation Du Weibo

广东工业大学自动化学院 武小梅

Faculty of Automation, Guangdong University of Technology Wu Xiaomei

摘要: 为了提高静止同步补偿器的耐压水平和容量, 尽量限制系统谐波失真, 同时减少逆变器的附属设备, 设计了一种新型级联式电压源逆变器构成的静止同步补偿电压控制器, 并对该控制器的运行进行了研究。根据该级联式三相三电平电压源逆变器的拓扑结构, 该静止同步补偿器可以在没有变压器的情况下运行, 并可以限制谐波失真到一个非常小的值。同时, 给出了由级联式多电平电压源逆变器构成的静止同步补偿器的运行原理。

Abstract: For advancing the withstand voltage level and capacity of STATCOM, limiting the harmonic distortion, and reducing the appertained devices of VSI (voltage source inverter), a new type STATCOM voltage controller constructed by cascaded multilevel has been designed, and a study on which was done. The VSI is with topology of three-phase 3-level, based on that, the STATCOM may operate without transformer, and the harmonic distortion could be limited to a very small value. The operation principle of the STATCOM constructed by cascaded multilevel VSI is also given in detail.

关键词: 静止同步补偿器 电压源逆变器 谐波

Key words: STATCOM VSI (voltage Source Inverter) Harmonic

中图分类号: TM714.2 **文献标识码:** B

1. 引言

无功功率补偿是保证电网高质量运行的一种主要手段, 也是当今电气自动化技术及电力系统研究领域所面临的一个重大课题, 正在受到越来越

越多的关注。在电力系统中, 电压和频率是衡量电能质量的两个最重要的指标。为确保电力系统的正常运行, 供电电压和频率必须稳定在一定的范围内。电压控制的重要方法之一就是

(上接第47页)

5) 高塔组立过程中, 安全保护网装设在塔笼内40m及下横担平口处, 并预留吊装点。

6) 构件吊点绑扎要牢固, 绑扎处要包、垫好, 吊件离地前应进行试起吊, 对须补强的构件吊点应予以可靠补强。

7) 吊装过程中, 偏拉控制绳要与起吊速度相适应, 均匀松放出, 保证构件在起吊过程中不卡、不碰、不刮, 也不能使控制绳张力过大。

8) 构件吊装就位时应加强监视, 如发现异常情况应立即停机, 查明原因, 不得强行吊装。

9) 提升抱杆前应将该段附材安装好, 并将螺栓坚固, 提升抱杆过程要慢进行, 对腰环部位重点监视, 严格控制提升抱杆的有效高度, 防止抱杆发生倾倒。

10) 应尽量做到提升抱杆后即日进行吊装, 吊件不得在空中停留或过夜, 构件就位后应及时

连接并紧固螺栓, 严禁浮搁于塔上。

11) 特殊部位设双重保护, 如绞磨过夜除应将磨绳绑死在绞盘上外, 还应用元宝螺栓、卸扣与地锚拉棒锁好。

12) 每天开工前要认真检查各起重、提升系统的钢丝绳、地锚等受力部位情况, 对机具进行空载启动试车, 以防因外力破坏或失窃而引发事故。

5. 结束语

通过施工实践证明, 采用四根 $\phi 273$ 钢管扒杆组立大跨越高塔, 所用工器具少, 现场布置简单, 钢管扒杆具有自身重量轻, 使用灵活的优点。该项高塔施工, 经严密的精心组织和严格的现场管理, 历时35天安全、顺利完成, 施工速度满足工期的要求, 同时有效地降低工程成本, 符合安全施工和节省经济的原则, 值得在同类型的高塔组立施工中借鉴应用。

统的无功功率进行控制。随着电力系统和电力电子技术的发展,补偿无功功率的方法从并联电容器到调相机^[1]的动态补偿,目前已广泛应用了性能更为良好的静止无功补偿装置。20世纪80年代,美国人L.Gyugyi发明了基于电压源逆变器的可以从感性到容性平滑地调节无功功率的无功功率调节装置,即静止同步补偿器^[1,2,3,5,6,7,8](Static Synchronous Compensator, STATCOM)。

静止同步补偿器(STATCOM)由于能够有效提高系统的功率因数、改善系统电压水平、调节精度高、可连续调节等诸多优点而得到发达国家的广泛应用,成为了现代电力系统中重要的新型一次设备之一。它是柔性交流输电系统(FACTS)的一个重要组成部分,是无功补偿的发展方向。

在STATCOM装置中,主电路的核心部分是电压型逆变器,但是受单管功率器件耐压水平的限制,目前静止同步补偿器主电路的耐压水平还有局限。当电压超过6kV时,往往需要器件串联技术、多电平变流器结构或多重化技术^[1,2,3,8]。同时大量采用独立直流电源的逆变器结构^[1]。

采用级联式逆变器作为STATCOM主电路可以省去大量钳位二极管和电容,所以,本文将对一种由新型级联式电压源逆变器构成的静止同步补偿器的运行和控制进行仿真研究。该逆变器的拓扑特点是各级联H桥逆变器的直流侧电压幅值不相等且 $V_{c1}:V_{c2}:V_{c3}=1:2:4$,其优点是通过采用适当的控制方法,可以获得较好波形质量的电压输出(2^{n+1} 级电平输出, n 为级联逆变器数)。而常规 n 级H桥级联式逆变器,只能获得 $2n+1$ 级电平输出电压。这种新型逆变器结构不需要变压器、钳位二极管或飞跨电容。

本文对控制电压源逆变器输出电压幅值并最小化谐波分量的原理进行论述,详细地说明了如何用闭环控制器来控制逆变器的无功功率输出以及用闭环控制器来稳定电容器的直流电压。

2. 静止同步补偿系统的工作原理

图1给出了用电压源STATCOM补偿的配电系统的示意图。

STATCOM通过连接电抗 X_m 并联到网络上,并且能够产生一个和母线电压同相的受控正弦输出电压,其中是与STATCOM相连的电网电压。

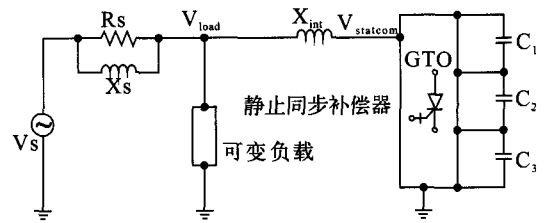


图1 用电压源STATCOM补偿的配电系统

如图2为STATCOM调节无功的原理示意图,其中直流侧为储能电容,为STATCOM提供直流电压支撑,GTO逆变器通常由多个逆变器并联而成,其主要功能是将直流电压变换为交流电压,而交流电压的大小、频率和相位可以通过控制GTO的驱动脉冲进行控制。

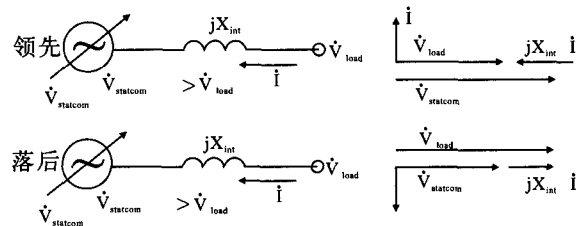


图2 STATCOM调节无功原理示意图

整个STATCOM装置相当于一个电压大小可以控制的电压源,设STATCOM装置产生的电压为,系统电压为,连接电抗为 X ,则STATCOM装置吸收的电流为:

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}_{load} - \dot{V}_{statcom}}{jX_{int}} \quad (1)$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}_{load} - \dot{V}_{statcom}}{jX_{int}} \quad (2)$$

因此STATCOM装置吸收的视在功率为:

$$S = \dot{I} \dot{V}_{load} = \dot{V}_{load} \frac{\dot{V}_{load} - \dot{V}_{statcom}}{-jX_{int}} \quad (3)$$

$$S = \dot{I} \dot{V}_{load} = \dot{V}_{load} \frac{\dot{V}_{load} - \dot{V}_{statcom}}{-jX_{int}} \quad (4)$$

通常情况下, STATCOM装置只吸收很小的有功功率或不吸收有功功率,因此其产生的电压 U_i 与系统电压 U_s 相位相同,因此STATCOM装置吸收的无功功率为:

$$\begin{aligned}
 Q &= \text{Im}(S) \\
 &= \text{Im}(\dot{V}_{load} \frac{\hat{V}_{load} - \hat{V}_{statcom}}{-jX_{int}}) \\
 &= V_{load} \frac{V_{load} - V_{statcom}}{X_{int}} \quad (5)
 \end{aligned}$$

由式(5)可推论,当控制STATCOM装置产生的电压小于系统电压,即 $V_{statcom}$ 幅值低于 V_{load} 时,STATCOM装置吸收的无功功率 $Q>0$,STATCOM从系统吸收无功,此时STATCOM装置相当于电感;当控制STATCOM装置产生的电压大于系统电压,即 $V_{statcom}$ 的幅值超过 V_{load} 时,STATCOM装置吸收的无功功率 $Q<0$,系统吸收无功,此时STATCOM装置相当于电容。由于STATCOM装置产生的电压的大小可以连续快速地控制,因此STATCOM吸收的无功功率可以连续地由正到负快速地调节。

3.级联式三电平电压源逆变器运行原理

3.1 级联式三电平电压源逆变器的拓扑结构

图3为级联式电压源逆变器的主电路拓扑图,即一个级联式三相三电平电压源逆变器(VSI)的拓扑图。一个级联式三相VSI由三个相同的单相逆变器链组成^[4],每个单相链又包括三个有独立直流电源的级联式全桥逆变器。

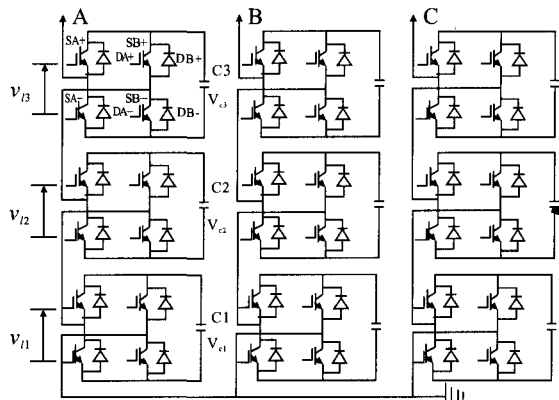


图3 三相三电平级联型电压源逆变器的拓扑图

3.2 新型级联式电压源逆变器运行原理

根据图3中级联式三相三电平电压源逆变器(VSI)的拓扑图,在每个单相链的级联式全桥逆变器中,典型的电源是从电容器获得的。每个直流电源的电压幅值都是按照 V_{dc} , $2V_{dc}$, 和 $4V_{dc}$ 的二进制的比例组成。在一个基波周期内开关被强制换向以合成一个15电平的梯级输出电压。适当地进

行开关换向,可以最小化谐波分量并且使梯级波形几乎是正弦。

由三电平VSI的结构可得:

$$v_{av} = v_{i1} + v_{i2} + v_{i3} \quad (6)$$

其中, v_{av} 是输出相电压; v_{ii} , $i=1, 2, 3$, 是每级的输出电压。

$$v_{i1} = +V_{C1}, 0, -V_{C1} \quad V_{C1} = V_{dc}$$

$$v_{i2} = +V_{C2}, 0, -V_{C2}$$

$$V_{C2} = 2V_{dc}$$

$$v_{i3} = +V_{C3}, 0, -V_{C3} \quad V_{C3} = 4V_{dc} \quad (7)$$

对于同一电平 i ,每个逆变器桥的开关交互运行。当输出电压为 $+V_{Ci}$ 时, S_{Ai+} 和 S_{Bi-} 关;当输出电压为 $-V_{Ci}$ 时, S_{Ai-} 和 S_{Bi+} 关;当输出电压为0时, S_{Ai+} 和 S_{Bi+} 或 S_{Ai-} 和 S_{Bi-} 成对处于关状态。

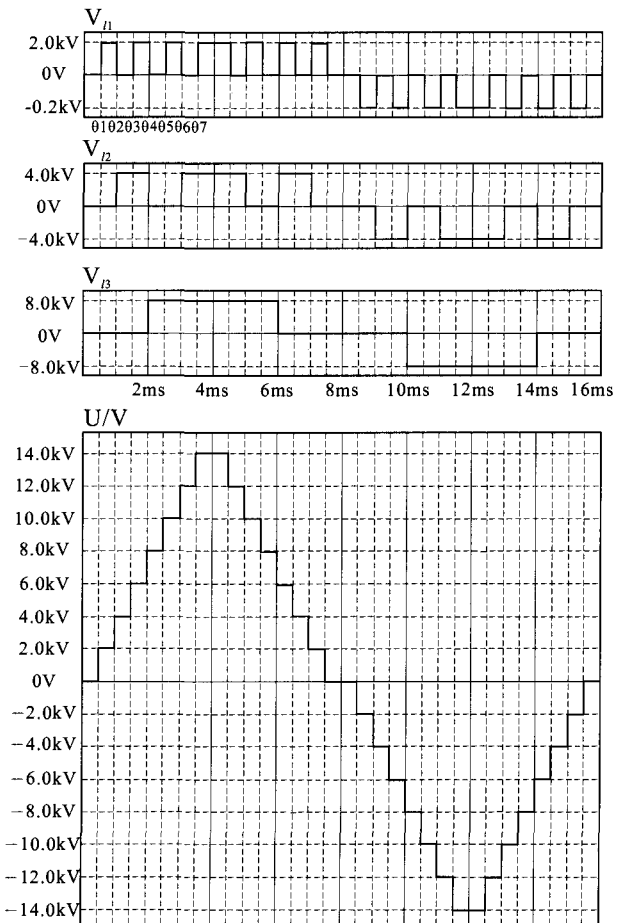


图4 典型的输出电压

图4给出了典型的每级输出电压和全部电压的波形。其中 v_{i1} 的触发角分别为 $\theta_1 \sim \theta_7$, v_{i2} 的触发角分别为 θ_2 , θ_4 和 θ_6 , v_{i3} 的触发角为 θ_4 。因此 v_{i1} 、 v_{i2} 和

v_b 叠加可以形成一个近似正弦波。

3.3 谐波分析

通过频谱分析, 下述公式可以获得相输出电压的基波和谐波分量

对于 $k = 1, 2, 3, \dots$

$$v_{av} = \sum_{k=1}^{\infty} \hat{V}_{2k-1} \sin[(2k-1)\omega t] \quad (8)$$

其中 \hat{V}_{2k-1} 是第 $2k-1$ 个谐波分量的幅值的峰值, 由下式得:

$$\hat{V}_{2k-1} = \frac{4V_{dc}}{(2k-1)\pi} \sum_{j=1}^7 \cos[(2k-1)\theta_j] \quad (9)$$

对于 n 级双臂多电平电压源逆变器 $N=2^n-1$ 并且 θ_j 是调制(触发)角。对于三电平逆变器, 基波相电压有效值 V_a 以及从(9)中可得的最大相电压由下式导出:

$$V_a = \frac{4V_{dc}}{\sqrt{2}\pi} \sum_{j=1}^7 \cos(\theta_j), \quad V_{a,max} = \frac{28V_{dc}}{\sqrt{2}\pi} \quad (10)$$

调制度, MI , 或幅值调制量被定义为:

$$MI = \frac{V_a}{V_{a,max}} = \frac{1}{7} \sum_{j=1}^7 \cos(\theta_j) \quad (11)$$

在一个三相系统中, 三的倍数次谐波可以被消除。为了最小化5次、7次、11次、13次、17次和19次谐波, 由式(9)导出式(12)。

对于 $h = 5, 7, 11, 13, 17, 19$

$$V_h = \sum_{j=1}^7 \cos(h\theta_j) = 0 \quad (12)$$

表1 三电平电压源逆变器的开关模式举例

MI	调制角的角度						
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7
0.510	25.8805	40.5482	48.8618	56.1212	65.0594	74.1465	89.0777
0.550	20.2311	33.8102	47.4581	54.07	62.2175	70.1873	89.2611
0.631	13.2009	31.8679	38.8523	48.5123	60.8481	61.2893	79.3317
0.800	7.21927	13.0692	20.8499	27.7483	39.1273	54.5284	62.7217
0.886	5.25975	12.0722	13.3786	19.1081	27.0092	36.8813	51.698

用牛顿-拉夫逊数值方法可以解式(11)和式(12), 可以获得触发角的集合。这些解被记录在一个开关模式表中, 并且在STATCOM运行的时候应用。因此, STATCOM基波输出幅值是可控的, 并且5次、7次、11次、13次、17次和19次谐波不是被完全消除就是被最小化了^[4]。表1列出了部分

触发角的解。

4. 新型级联式多电平电压源逆变器 STATCOM 母线电压控制器控制策略

STATCOM的控制任务是根据控制目标确定其逆变器输出电压与系统同步信号间的微小的相位差, 从而控制STATCOM向系统发出(或吸收)的无功功率, 进而改变电力系统的电压调节, 为输电系统或配电系统贡献力量。

对于不同的运行状态, 通过动态地控制从多电平电压源逆变器到电网的无功输出来将负载母线电压维持在1pu。为了调节负载母线电压, 图5给出了负载母线电压的控制策略。其中包括比例积分(PI)控制器、V-I曲线和开关模式表。

PI控制器的反馈信号由V-I曲线得到的负载母线电压V和流入逆变器无功电流I。PI控制器的输出为MI。

5. 仿真

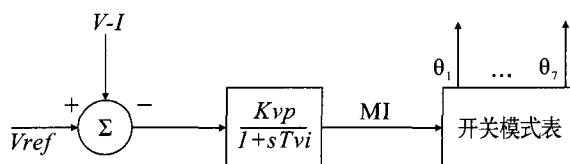


图5 负载母线电压控制策略

5.1 仿真算例参数

交流线电压有效值为13.8kV, 频率60Hz; 电源侧电感为10mH, 连接电感为10mH; 负载无功变化范围: -2.2MVar ~ +7MVar; 标准的调制度标幺值0.631, 欠调制范围: 0.51到0.63, 过调制范围: 0.632到0.886; STATCOM的额定输出10MVar; 直流电压额定值: $V_{c1}, V_{c2}, V_{c3} = 2, 4, 8kV$; 直流电压的调节因数 $\epsilon = 5\%$; 直流电容: $C1, C2, C3(mf) = 16.6, 4.1, 2.6$ 。

5.2 电压源逆变器的宏观模型

在PSPICE仿真中采用宏观模型^[5]来表示电压源逆变器, 它可以用一个由受控电压源和受控电流源组成的多端口电路(输入、输出和控制端口)来表示, 而不是用给定的开关来表示。这样做可以简化电路, 使分析集中在控制策略上。

5.3 负载母线电压调节

图7给出了级联式电压源逆变器在产生超前无功和吸收滞后无功时的运行状态。在负载母线电压的闭环调节系统中, 初始状态下, 负载为

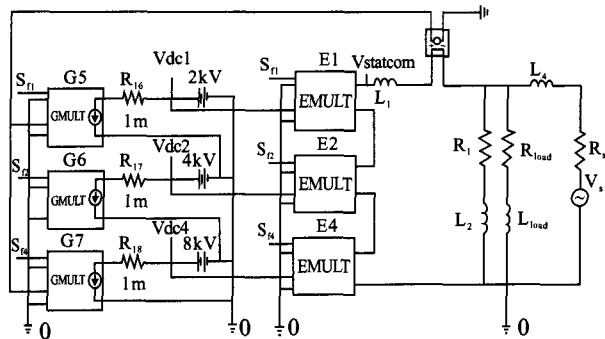
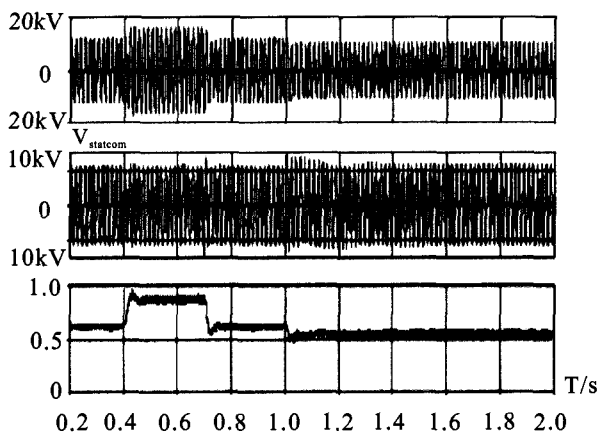
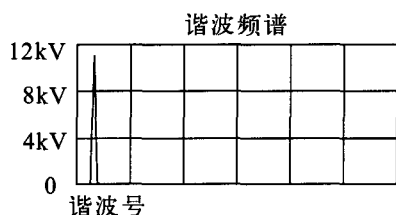


图6 级联式电压源逆变器的宏观模型

0.036 MVar的感性负载,母线电压为1pu。在0.4s时,投入6.78 MVar感性负载。为维持母线电压在1pu,在母线处通过逆变器增加容性无功。电压控制器响应这种运行状态的变化,调节调制度由逆变器产生相应的无功。负载母线电压被重新调节回1pu。然后,在0.7s,这个负载又被切除掉。1.0s又投入-2.2MVar的容性负载。后两个调节过程类似第一个调节过程。通过PSPICE仿真程序,得到下面的波形和频谱分析图。

从负载电压波形和频谱可以看出,在闭环控制器的作用下,负载电压得到了较好的调节效果。在扰动的作用下,负载电压能在短时间内迅速恢复到稳定值,并且只有很小的谐波。

(a) 负载变化时 $V_{statcom}$ 、 V_{load} 和MI波形的比较

(b) 的闭环频谱分析

图7 加入感性和容性负载后负载电压及其频谱分布

6.结束语

本文基于控制理论和电路原理的基本概念,推导出由新型多电平电压源逆变器进行无功补偿的控制器。该方法有如下特点:①由于VSI的级联式结构,STATCOM可以在没有变压器(直接接于母线)的情况下运行;②由于采用了所选的消除谐波调制方法,可以限制谐波失真到一个非常小的值。因此也不需要输出侧的滤波器;③物理概念清晰,所设计的控制器简洁有效。

随着电力电子技术(包括器件制造技术、主电路拓扑技术、脉冲调制技术)及自动控制技术、计算机技术、微电子技术和能量储存技术的发展,包括STATCOM在内的各种FACTS技术装置在现代电力系统中的应用必将越来越广泛和越来越成熟。本文设计的控制器由于采用了有利于消除谐波的调制方法,可以限制谐波失真到一个非常小的值,且系统可以在没有变压器的情况下运行。经过不断的完善和补充后,该控制器将可以得到更加广泛的使用。

参考文献:

- [1] 姜齐荣,谢小荣,陈建业.电力系统并联补偿结构、原理、控制与应用.机械工业出版社,2004,7: 7-9
 - [2] 谢小荣,严干贵等.三电平PWM变频调速控制系统的MATLAB仿真平台.电网技术,2003,27(9): 18-22
 - [3] 刘文华,宋强等.基于链式逆变器的50MVA静止同步补偿器的直流电压平衡控制.中国电机工程学报,2004,24(4):145-150
 - [4] K.V.Patil, R.M.Mathur, J.Jiang, and S.H.Hosseini, "Distribution System Compensation using a new Binary Multilevel Voltage Source Inverter", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.14, No.2, April 1999, pp. 459-464
 - [5] 郭红霞,吴捷等.基于强化学习算法的静止同步补偿电压控制器.电网技术,2004,28(19): 9-13
 - [6] 耿俊成,刘文华等.链式STATCOM的数学模型.中国电机工程学报,2003,23(6): 66-70
 - [7] 马晓军,姜齐荣等.静止同步补偿器的分相不对称控制.中国电机工程学报,2001,21(1): 52-56
 - [8] 魏文辉,刘文华等.大容量链式STATCOM的基频优化PWM控制.清华大学学报(自然科学版),2004,44(10): 1306-1309
- 作者简介:
杜伟波(1968-),男,广州市人,大学本科,工程师,从事电气工程技术管理及应用工作。
武小梅(1972-),女,吉林省吉林市人,硕士,讲师,研究方向包括电力电子技术在电力系统中的应用。