

# 目 录

.....	I
.....	II
1 绪论.....	1
1.1 无功和谐波分析理论基础.....	1
1.2 无功补偿.....	2
1.3 无功补偿装置的发展.....	3
1.4 本文主要研究内容.....	5
2 SVG 设计.....	6
2.1 SVG 工作原理.....	6
2.2 SVG 主电路设计.....	7
3 SVG 无功电流检测和控制方法.....	10
3.1 p-q 理论基础.....	10
3.1.1 p-q 检测法.....	10
3.1.2 $i_p - i_q$ 检测法.....	14
3.2 控制算法.....	15
3.2.1 直接控制法.....	16
3.2.2 间接控制法.....	20
4 SVG 仿真研究.....	21
4.1 软件简介.....	21
4.2 SVG 仿真模型建立.....	21

4.2.1 主电路模块.....	22
4.2.2 无功电流检测模块.....	22
4.2.3 三相桥式逆变模块.....	23
4.3 仿真结果.....	25
4.3.1 补偿谐波和基波无功.....	25
4.3.2 仅补偿基波无功.....	28
4.4 频谱和直流侧电压分析.....	30
5 结论与展望.....	33
致谢.....	35
参考文献.....	36

## 摘 要

电力电子器件使用越来越多,电力系统中谐波和无功增多极大影响了电网供电质量,随着电网飞速发展,电力系统稳定性和可靠性问题也随之出现。所以谐波治理和无功功率补偿已经成为电力系统和电力电子领域内的一项重大研究课题,为了提高电网的供电质量常用无功补偿的方法来补偿基波和谐波无功。早先采用无功补偿装置(SVC等),如电容器,熔断器等的应用常常会使电路发生严重的故障,不能够满足现在电力用户的需求。然而随着大功率电力器件的迅猛发展,一种采用新型低损耗 IGBT 功率器件的静止无功发生器(SVG)诞生了,以其好的谐波特性,快速响应性,节能,良好补偿性能,安全可靠等诸多优点,广泛应用于电力系统中。

本篇文章设计了由电力电子器件组成的三相全控桥式电压型逆变电路的静止无功发生器(SVG),通过调节网侧电压和负载电流相位,达到补偿谐波和基波无功的效果。首先介绍了无功补偿设备的发展及国内外研究状况,通过对无功补偿器的比较,SVG 已经成为无功补偿的发展潮流。其次依据 SVG 的工作原理,对其工作特性进行了具体的剖析。无功能够得到实时补偿的关键就是无功电流的检测,本文基于瞬时无功功率理论,将负载电流解耦成基波(含有功和无功)和谐波分量,在  $abc-dq0$  坐标变换下,产生新的指令电流。最后对逆变器开关器件的控制策略进行了分析,提出了三角波和电流滞环控制方式,并作了比较。

在 MATLAB/SIMULINK 环境下建立仿真模型,经过一系列的调试与仿真,可得网侧一相电压和电流同相位,达到了无功补偿的效果。

仿真出来的结果表明了基于瞬时无功功率理论的静止无功发生器(SVG)设计的合理性与正确性。

**关键词:** 无功补偿, 瞬时无功功率理论, 三角波调制, SVG

With the use of the power electronic device, the harmonic wave and reactive power have a serious effect on the quality of power supply, which are in electrical power system. Following the development of the power grid, power system's stability and reliability problem is increasingly serious. So harmonic wave suppression and reactive power compensation within the power system and power electronics have become an important research topic. People compensate the harmonic wave and fundamental reactive power by reactive power compensation methods to improve the quality of power supply in the power grid. Previously, the use of SVC, like capacitor, fuse and so on, which often happen serious accidents, it is difficult to meet the people's increasing demand. However, with the rapid development of high-power electronic devices, a new low-loss IGBT power device of the static var generator (SVG) was born, with good harmonic characteristic, faster dynamic response, lower energy, good compensation performance, reliability and safety, which is widely used in electronic power system.

This paper designs a three-phase fully-controlled bridge voltage type inverter circuit of static var generator (SVG) based on power electronic devices, adjusting grid voltage and load current phase to compensate harmonic wave and fundamental reactive power. First, introducing the development, domestic and foreign research situation. Comparing with the reactive power compensation devices, the result is that SVG is a trend of reactive power compensation. Then, according to the principle of SVG, analyzing the working characteristic in detail. The key is detecting reactive current, the paper introduces the reactive current detection methods based on instantaneous reactive theory, decouples load current to harmonic and fundamental component, with  $abc-dq0$  Coordinate transformation, produces reference current. Finally, analyzing the switching devices of the inverter bridge's control strategy, including triangular wave control and current hysteresis control mode, having a comparison of them.

We build a system simulation model on the Matlab/Simulink situation. After a series of debugging and simulation, we know power grid have the same phase in voltage and current, achieving the effect of reactive power compensation.

Simulation results show the design of SVG which based on instantaneous reactive power theory is correct and reasonable.

**Key words:** Reactive Power Compensation, Instantaneous Reactive Power Theory, Triangular wave control, SVG

# 1 绪论

## 1.1 无功和谐波分析理论基础

### a. 无功功率的产生

目前很多用电设施都是依据“电磁感应”原理而工作的，如继电器、变压器、电动机等，通过建立交变磁场来转换和传递能量，建立交变磁场和感应磁通需要的电功率称为无功功率<sup>[1]</sup>。所谓的“无功功率”不是“没有用”的电功率，只是作为能量转换的一个媒介，对外并不做功；所以在供电电网中不仅要有有功电源，还要有无功电源，两者缺一不可。

在电网中，电源供应负载的功率有两种：有功功率和无功功率。有功功率是维持用电设施正常工作时需要的电功率，即把电能转变成另外形式的能量（机械能、热能、光能），对外做功；无功功率相对较抽象，是电气设施中建立和维持磁场的电功率，作为电能转变为另外形式能的枢纽，只要有电磁线圈的装置，一旦建立磁场，便会消耗无功功率。

### b. 谐波产生

基波是频率与工频（我国一般为50Hz）相同，谐波是电流中含有的频率为基频的整数倍的电量，通常指对周期性的非正弦电量通过傅里叶级数分解后，大于基频电流产生的电量，通俗讲，只要与工频频率成分不同的都可称之为谐波。理想供电系统中，电流、电压是正弦波。谐波主要由电路中的非线性负载产生，电流流经负载与电压呈非线性关系，产生非线性电流，即产生谐波。如半导体晶闸管、二极管、整流器等都是非线性负载。

电流谐波总畸变率定义

$$THD_i = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中， $I_h$ -----总谐波电流有效值；

$I_1$ -----基波电流有效值。

### c. 功率因数

正弦电路，电路的有功功率就是其平均功率

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u i d(\alpha) = UI \cos\varphi \quad (1-2)$$

式中， $U$ 、 $I$ ——电压电流有效值； $\varphi$ ——电压超前电流相位差。

视在功率为电流电压有效值乘积

$$S = UI \quad (1-3)$$

无功功率定义

$$Q = UI \sin \varphi \quad (1-4)$$

功率因数即有功功率和视在功率的比值，同时由电流电压相位差决定

$$\lambda = \frac{P}{S} = \cos \varphi \quad (1-5)$$

## 1.2 无功补偿

### a. 谐波的危害

谐波会造成电机发热，损耗，机械振动，发出噪声和产生谐波过电压，致使电气设备绝缘老化、灵敏性降低和使用寿命的缩减；谐波电流是电网线损的一部分，谐波源送出的有功是从电网吸收的基波转变而来的，在电网中会带来损耗，因此这些谐波对电力系统是有害的；谐波对通信线路也有影响，轻者产生噪声，影响通信质量，重者造成通信失真，影响人们的正常生活。

### b. 无功补偿的意义

电力系统中的变电所安装的无功电源，会改变电力系统中无功地流动方向，改善电网电压大小，降低自身网络损耗和增强电网的动稳定性和可靠性，叫做无功功率补偿。无功功率自身没有什么危害，只是设施需要的多的无功功率，会降低电网工作效率，供电能力，经济效益，如不采取补救方法，让无功功率达到就地均衡，可能会出现系统故障，甚至崩溃。

电力的发展给人们的生活和生产带来了极大的便利，人们在享受着生活的同时，也要考虑电力器件的应用给电网带来的危害。最近几年，各种高端科技的不断涌现，人们的生活水平得到了相当大的提高，人们已经离不开电能，越益需求高质量电力能源。当今全世界都在倡导保护环境和节约能源，电力是一种特别重要和不可替代的能源，解决了很多当代生产问题，为整个社会的向前发展提供了动力，同时电网中的无功功率给电网的长期工作带来了危害。由于当代感性电气设备在消耗有功功率的同时也在吸收着大量的无功功率，如许多装置中电动机使用以及维持旋转磁场损耗的都是无功功率，电力系统输入有功和无功，用电设备消耗无功，电网为满足用户需求就会多送无功，会增加由无功电流带来的有功损耗。无功功率不仅导致发电机的出力降低，还会影响用电设备运转，增加网络损耗，降低总体电压水平，降低供电质量。补偿无功不能都由发电机提供经长距离输送，这样会产生很大损耗，这时就要在无功产生的地方有效补偿，即“就地无

功均衡，改变无功潮流涌向”<sup>[2]</sup>。无功补偿的好处：

(1)无功补偿能够减少电网中的功率损耗和电能损耗，降低线路及变压器损耗，提高设备出力，增加用电设备使用年限；

(2)改善电能质量，改善电力系统稳定性和可靠性，降低电网电压的波动，有利于长距离输电<sup>[3]</sup>；

(3)减少发电设备投入，节约投资，提高电网功率因数和带载能力，减少发电设施的投入，提高经济效益。

### 1.3 无功补偿装置的发展

#### a. 无功补偿装置的发展历程

无功补偿装置在 50 多年间的发展历史中由简单到复杂，从早期无功装置到现代无功装置，经历了电容器、同步调相机、静止无功补偿装置以及现在的静止无功发生器 4 个时期<sup>[4]</sup>。

1、电力电容器补偿设备。电力电容器从电网吸取容性无功，适合补偿感性无功负载。单机容量不大，联合使用，其容量可大可小，使用率可集中可分散，灵活性大。电容器组价格低、损耗小、运行维修方便、能提高负载的功率因数。然而其无功功率正比于所在节点电压平方，即

$$Q_c = \frac{U^2}{X_c} \quad (1-6)$$

式中， $X_c$ ——电容器容抗， $X_c = \frac{1}{\omega C}$ ；

$U^2$ ——电容器所在节点电压平方。

可知，当节点电压下降时，供给系统的无功也随之减少，无功减少会使电网电压降低，进而会进入循环，无功虽然减少了，但是电压也在相应减少，所以电力电容器补偿需要电压的支持。

2、同步补偿机（调相机）。它是一种生产无功功率的同步电机，过励磁发出感性无功，欠励磁吸收感性无功。其励磁的改变可以平滑调节无功输出，单机容量能够很大。通常直接安装在用户附近，以降低运输过程的无功损耗。其电压调节效应，即 $-\partial Q_c / \partial U$ 有正值，端电压下降，输出感性无功增大，独特优点。因为是旋转电机，其有功损耗较大。并且运转维修复杂，运行噪声较大，响应速度较慢，逐渐淡在人们的生活<sup>[5]</sup>。

3、静止补偿器（SVC）。优点：使用晶闸管等电力电子元器件构成的开关控制电容器和电抗器的投切，能够发出感性和容性无功，依靠自身的速调作为系统动态无功电源，防止电压波动、减弱动态电压闪变和提高系统稳定性。缺点：电

子开关的投切带有高次谐波，任何电子元件的损坏影响整个系统的运行。静止补偿器分为晶闸管控制电抗器（TCR）、晶闸管投切电容器（TSC）和两者的混合装置（TCR+TSC）<sup>[6]</sup>。TCR 经电感 L 和开关电路构成，晶闸管截止电压 4-9KV，导通电流 3-6KA。在实际生活中，电压等级较高，通常是很多晶闸管串联使用，作为一个开关，达到在给定功率下其对截止电压的要求。同极的触发脉冲使开关阀导通，交流电过零时，开关阀能自关断，然后重新触发导通。TSC 由电容器、双向晶闸管开关及电抗器构成，电抗器的作用是避免发生故障时，出现的冲击电流、谐振等。TSC+TCR 是由触发角  $\alpha$  控制的，总的无功需求与无功输出相反，即电抗器吸收和电容器发出的无功的差值就是装置从系统吸收的净无功。

4、静止无功发生器 (SVG)。伴随着大功率集成电力电子器件的出现，尤其是相控和斩控技术、脉宽调制技术和四象限变流技术的研制，一种采用自换相变流技术的高级无功补偿设备诞生了，即 SVG。SVG 另称为静止同步补偿器（STATCOM），始现于 20 世纪 80 年代，响应速度快，谐波电流小，补偿特性好，损耗低，吸收无功连续等，已经成为无功补偿的一项重要研究和应用<sup>[3]</sup>。最后，将电容器、调相机、各种静止补偿器性能作比较，如下表 1-1<sup>[7]</sup>

表 1-1 电容器、调相机和静止补偿器比较

性能	电容器	调相机	静止补偿器（SVC）			静止无功发生器（SVG）
			晶闸管控制电抗器（TCR）	晶闸管投切电容器（TSC）	混合型静止补偿器（TCR+TSC）	
控制方式	不连续	连续	连续	不连续	连续	连续
响应速度	快	慢	快	快	快	很快
灵活性	好	好	很好	好	好	很好
调节精度	差	好	很好	差	较好	很好
谐波电流	无	少	多	无	多	少
单位投资	低	高	中等	中等	低	高
损耗	低	大	中	小	中	小
噪声	强	强	弱	弱	弱	弱

#### b. 无功补偿装置的国内外研究现状

20 世纪 70 年代，大功率集成全控型器件得到飞速发展，如 IGBT、GTO、GTR、IGCT 等。基于大功率电力电子器件，相应产生了 SVG，相比于传统无功补偿装置，以其快速响应性，广泛的调节范围，小的阻尼振荡，灵活性好，开关速度快，损



以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/857153034002006144>