

交流供电系统中的电力电子技术

邓隐北，张子亮，韩雪雪
河南亮明电控设备有限公司 河南郑州 450044

摘要：本文阐述了电力电子技术在交流供电系统中的应用，重点介绍了俄罗斯利用半导体开关器件制作的变换器，不仅改善整流换向，而且消除了电压电流的波形畸变。当建立“柔性”线路时，采用了最合理的接线方案：静态补偿器(STATCOM)加能量流通的组合变换器，可实现两个不同交流电力系统的整合。最后推出了高性价比的混合式滤波器，经济有效地提高了电网的电能指标和质量。

关键词：电力电子技术，半导体开关器件，变换器，静态补偿器，有源电力滤波器，混合滤波器。

The Power Electronic Technique in Application to AC Supply System

Deng Yinbei, Tang Qingwei, Shang Junmei
Henan Senyuan Electric CO.LTD Henan Zhengzhou 450016

Abstract: A applications of the power electronic technique for the AC power-supply system are described in this paper. The Russian converter fabricated with semiconductor switching device is introduced principally. Not only improve the commutation, but also the wave distortions of current and voltage are eliminated. For establishing "flexible" lines the most reasonable connection pattern is taken. The converter composed from the static compensator (STATCOM) add in the energy flow-through can realize the match between two distinctive AC (electric) power-systems. Last, The hybrid filter had high performance-cost ratio is proposed. The energy indices and the electric quality of network are lifted economic-effectively.

Keywords: power electronic technique, Semiconductor switching device converter, static compensator, active power filter, hybrid filter.

中图分类号：TN86 文献标识码：A 文章编号：1606-7517(2014)09-4-123

1 前言

现代世界的技术进步与电能的需求紧密相关，分析表明，在世界各国电能需求的动态增长，不仅与人口数量的增长有关，而且与国家经济增长的速度、技术发展水平以及其他因素有关，例如，发展中国家在实现电气化的初始阶段，电力需求的速度导致了每10年一次的成倍增长，而在工业发达国家，这一增长则稳定在每年1-2%，按照近20年来的预先估计，发展中国家期待的电力需求增长为220%，而在工业化国家仅为37%。考虑到各国地理条件及自然资源的不同，解决电气化课题的途径和技术方案以及所需的投资都是不同的。

从历史上看，交流电能的应用处于主导地位，交流输电

的主要优点是在电力传输线穿越的任何区间，均可保证电力的实际需求。长时间制约直流输电线路发展的重要因素是：不具备直流与交流有效转换的元器件基础。结果，直流输电系统的应用较少。但交流传输仍存在以下一些不足：

需要按照线路的负载调控电压；
存在无功功率，并需要控制其影响；
两个独立系统的同步问题；
在稳态和瞬态工况下对其稳定性的限制；
还应看到，在首次直流传输时也存在一些附加的困难：
为确保整流器的换向需要无功功率；
产生高次谐波；
变换装置的成本高；

随着电力电子元器件的发展，直流电力传输的成本不断下降，很多问题都迎刃而解了。现在，当距离超过800KM以上，如果其贯穿线路无功率流失（例如，沿海洋底面敷设线路时），直流传输在经济上是更有利的。

在俄罗斯，因输电距离长，能量资源与需求中心分布的不均，例如西伯利亚与部分欧洲电力系统（）之间，以及联合电力系统（）中心和外高加索（）之间，由于长距离能量的传输，限制了功率输送的能力，并且影响了供电的可靠性。因而限制了许多电站所输送的功率，以及并行电力传输线路上功率流向的分配不佳等。上述问题的解决取决于柔性电力传输线（FACTS）的发展，这种FACTS线路中，设有能操控电压和无功功率的装置，该装置用于补偿由非线性负载产生的功率，借助于电压变换器，则可对功率、电压和能量流向均不相同的系统进行整合。

2 半导体开关器件的发展与进步

近代GTO（门极可关断晶闸管）、GCT（门极换流晶闸管）、IGCT（集成门极换流晶闸管）等半导体开关器件，借助控制极上提供的负脉冲进行关断。它们在线路图上设计的运行电压达到4.5KV，电流在3KA以下；若应用了由4uF电容器组成的不同形式的补偿电路（），电流则可达5KA。为了断开大的电流，利用了“筛孔”结构的阴极，由小电感的驱动电路确保关断的同时性。由于整合了半导体开关元件组成的驱动电路，使控制电路的电感值大幅度降低。在GCT或IGCT中，全电流在很短时间内完成从阴极到控制极的换向。这一结构可减少电荷的积聚时间及电流衰减时间在3微秒以下。这些器件有时称为“硬性开关”器件。新型开关器件结构的另一优点是缓冲层与精细的正发射极连接，结果降低了断开时的功率损耗。值得注意的是：利用小电感的驱动电路，由于更陡的控制脉冲前沿，能实现快速而均匀的接通。

因GCT型半导体开关元件结构的完善，在电压6KV以下和电流6KA以下时，可确保通/断的时间不超过5微秒，并允许这些元器件的串联和并联。

利用低压的MOSFET场效应管，能加速或减缓GTO型开关器件的断开，这是建立快速操作高压器件的另一方案。利用在开关器件阴极串接低压MOSFET，这一研制样品证明：在电压6KV和电流4KA下具有良好的实用效果。

在制造高电压的大功率开关元件时，由于新的工艺取

得了显著成就，例如高压HVIGBT型开关元件，计划用于小电流的整流，电压为4.5KV，电流900A，其开关时间不超过6微秒。主要优点是操控比较简单，其外部电流可显著减小。但按电流来说，其应用范围不及IGCT型器件的广泛。

3 变换器装置的开发前景

开关器件为变换器线路图中的基本元件，但它不能决定变换器的技术经济指标。变换器的技术经济指标在很大程度上与电容器、变压器、电抗器的单位指标有关。后者的单位指标又很大程度上决定了直流和交流滤波器的重量与尺寸。例如，在直流插件（）中及实现无功补偿功能的变换器{静态补偿器（STATCOM）和有源滤波器（）}中，电容器用于电能的储存，借助电压变换器，将储存的能量变换为基波与高次谐波的无功能量。这样，如果在上世纪70年代，直流电容器的单位能量（比能量）为0.1千焦耳/公斤，那么在不久的将来，可望实现单位能量达到2千焦耳/公斤的电容器。用聚合薄膜材料制作的交流滤波电容器，改善了电容器的单位储能指标近20倍。

从另一方面，即建立分布气隙改善了电抗器磁路的单位指标。这种情况下，所利用的磁路（导磁体）是由压制的铁粉末和低导磁率相关材料的合金制成的。值得单独一提的是模块结构及其生产。目前主导公司已制造由驱动电路和主开关本体组成的成套开关，其实，当电压或电流逆变器高压模块批量生产时，就可望制造出不同电压和电流的变换器模块及滤波器等。这些电力电子装置的模块结构颇具广阔的开发前景。

开关器件的技术进步对变换器装置影响巨大，第一，电压和电流变换器可以在电网参数的综合平面内四象限工作，包括容性电流或感性电流的整流和逆变。通过脉宽调制（），可在变换器的输出调制成给定的电压或电流波形。由于给定的波形曲线可能产生电压或电流谐波，故应确保产生与需求正弦波形的无功电流，以消除由非线性负载引起的畸变。第二，在模块与模块之间或线路各个单元之间可分配负荷的多电平变换器电路得到推广。换句话说，有可能配合幅值和相位的调制，同时可限制各个单元的电压。

图1给出了多电平拓扑的原理接线图。图中所示为变换器的一个支臂（例如A相）二极管限压的三电平线路图。

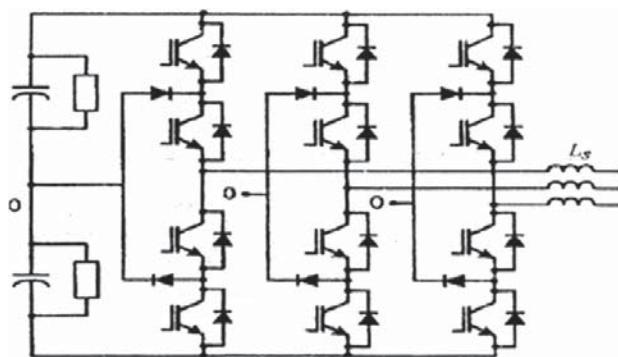


图 1 三电平变换器

不同电平的变换器一支臂的输出电压波形如图 2 所示，这是以三角形曲线进行电压调制的。从图中看到，变换器的电平级越多，输出电压的曲线形状越接近正弦波形。在每一级较低的调制频率下，结果能得到满意波形曲线的基波电压。但是，随着级数的增多，各个模块之间电压的不均匀度也增加。为了稳定电压水平，采用了可变换（浮动）的电容器 (flying capacitor)。然而，按直流布局，带级联电桥的多电平线路(图 3(a))获得更大推广。对多电平变换器，还有其他的级联线路如何选择，是一个需要优化的技术经济课题。

4 “柔性”输电线路

在柔性输电线路上的现代变换器装置，可完成以下功能：

- 操控无功功率；
- 操控电压并改变功率的流向；
- 作有源滤波器或混合滤波器使用；

基于电压逆变器建立的 CTATKOM，可实现最有效的无功补偿功能。俄罗斯进行了 CTATKOM 的研制工作。原

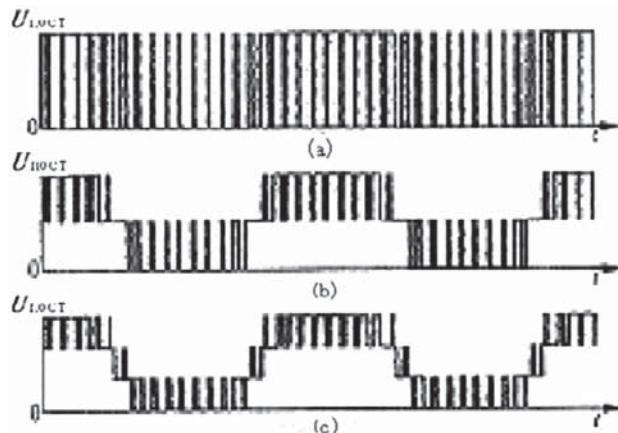
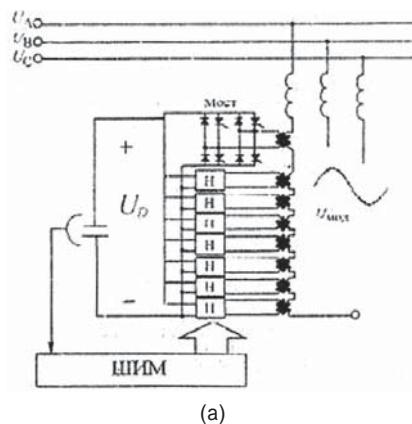
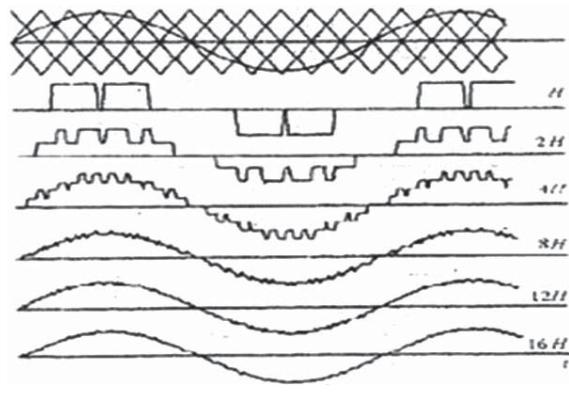


图 2 二电平 (a)、三电平 (b) 和四电平 (c) 变换器中的相电压图



(a)



(b)

图 3 补偿器的接线图 (a) 和带级联的变换器电压波形图 (b)

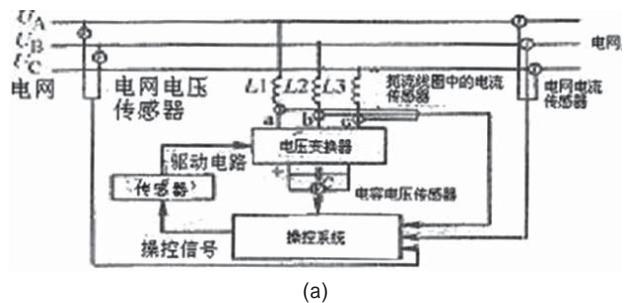
全苏动力和电气化科研所 () 已研制成首台带数字化操控的无功补偿器样机，该样机基于三相桥式电压变换器。图 4 为补偿器的线路图以及容性电流工况下的电压和电流波形图。考虑到可从 $-Q$ 到 $+Q$ 改变无功功率，电网和电容储能器的无功可进行变换。与传统的遥控系统 (CTK) 比较，其装置功率最小。CTK 包括：串联电容的补偿器，带可控硅操作的电抗器以及带电容器的宽带放大器 ()。此外，快速操作的 CTATKOM，周期小于工频周期的一半。

美国 () 能源局对“截止”功率问题推荐了两个技术解决方案：

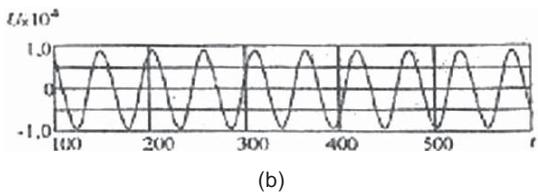
利用柔性传输线 (FACTs)；

利用高压的直流插件 ()，可连结功率、频率和电压相位均不相同的两个电力系统线路 (图 5)

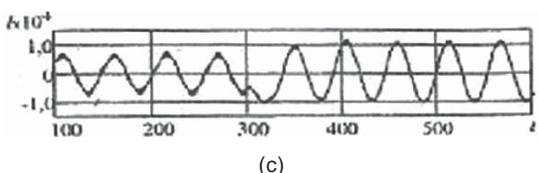
功率流通的联合调节器 () 由串联增压装置和并联补偿装置组成 (图 6)。这个调节器可操控能量流动的方向，电网的电压值以及负荷电流的相位角，同时，它还能完成的功能，但此时必须增大变换器的功率。



(a)



(b)



(c)

图 4 结构图 (a) 和电压波形图 (b) 及电流波形 (c)

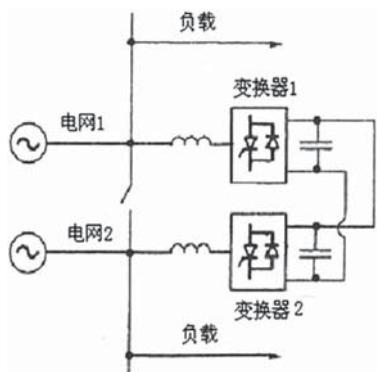


图 5 借助于直流插件连接不同的电网

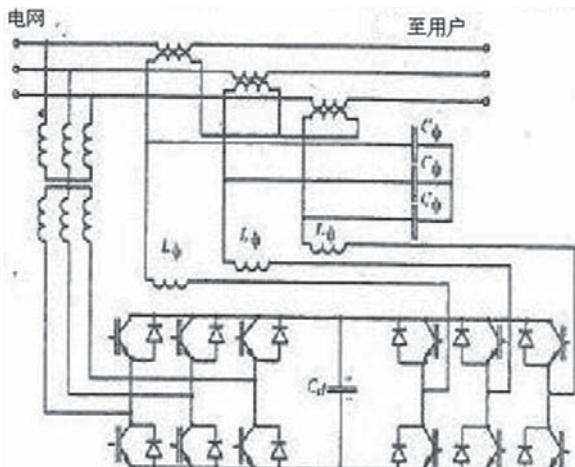
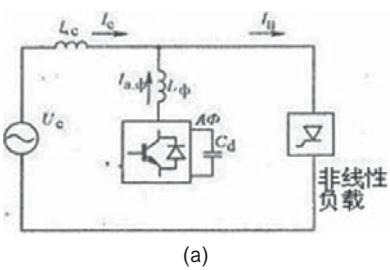


图 6 功率流通联合调节器的线路图

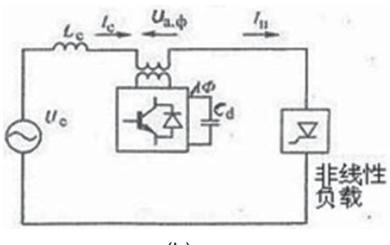
5 混合式滤波器的应用

若利用电压变换器的有源或混合式滤波器功能，则可在本质上改善线路电压的质量。通常为了滤波，利用 LC - 滤波器的无源元件，通过 LC 滤波器产生的谐振来消除电流或电压的高次谐波。这些电路一般由接至电力传输线路的滤波 - 补偿装置组成。其特点是结构简单，广泛出现在俄罗斯市场及国外的各家公司。为了有效的滤波，必须细致分析供电与用电系统的运行工况。如果改变系统的配置或接入新的用户，均可导致滤波器工作的不协调并降低其有效性。

因此，开始探索并联和串联有源滤波器（）的应用。这种必须容易适应负荷及系统结构的变化。原则是采用静态补偿器 (CTATKOM) 中同样的变换器，但具有更高的调制频率，因而降低了所用变换器的装置功率。图 7 为简化的接线图实例。在这里，当并联接入时，非线性负载（如整流器），畸变了的电流波形通过校正到正弦波形，当串联接入时，电网电压波形曲线的畸变将被消除。起到了抑制用户畸变功率的作用，这一功率不是有功功率，且在非线性负载与电容储能器之间形成环流。理想情况下，进入电网的电流曲线为正弦波形。此时，补偿了基波的无功功率。显然，需要的功率与非线性负载的功率不相上下，导致的价格偏高，如公司提供的 40KW 价格为 600 千卢布，与具有相近技术数据的无源滤波器比较，贵 20 倍。随着电力电子技术的发展，它的价格将会降低。现在，利



(a)



(b)

图 7 有源滤波器接线图 (a) 并联式 (b) 串联式

用混合式滤波器是经济合理的。为确保在低的花费下能有效的滤波，应采用混合滤波器作为有效的滤波工具。在这种滤波器中，其有源部分不大于滤波功率的 10%，而且，接入有源部分的方法有多种形式。图 8 为并联接入有源部分至无源滤波器的接线图实例，该无源滤波器是按 n 次谐波设计的。当滤波电网的电压处于稳定工况下，这一混合式滤波器自动地适应电流的任何变化，在过渡工况下，则自动降低谐振回路“品质因数”(Q 因子)，以避开不期望的瞬变过程。

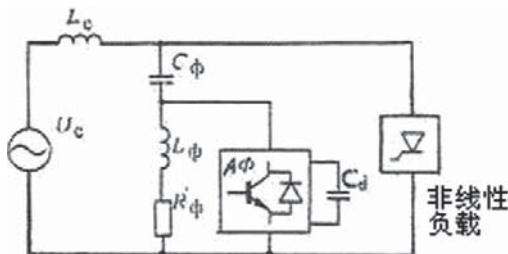


图 8 混合式滤波器

串联式 具有比较小的功率，同样也有给定相位的增压功能。也即，在电源电压振荡（电压相位振荡、短时电压崩落、闪烁等）情况下，这种 能确保电网电压的稳定性。日本利用了串联和并联滤波器的组合，开关器件使用 IGBT 时，功率由 10kVA 到 2MW，采用 GTO 时，功率由 5MW 达到了 60MW。

6 结论

已建立半导体开关器件的基础技术，利用这些器件制作的变换器，不存在开关器件的强制性整流换向，消除了工频下所形成电流的波形畸变。在很多国家已将这一技术成功用于电力系统的变换器制作；

“柔性”线路和 插入技术的利用，是交流与直流输电线路出现问题的最佳解决方法；

当建立“柔性”线路时，采用变换器装置的最合理接线方案是 CTATKOM（静态补偿器）和“能量流通的组合变换器”。由于结合了 （直流插件）及带 PWM 的电压变换器，可实现两个不同交流电力系统的整合；

有源滤波器是提高电能质量最有发展前景的装置；

考虑到 的高价位，初期阶段更广泛应用有源滤波和无源滤波器的组合，也即利用混合式滤波器是合理的。

参考文献

- [1] СИТИКОВ В.Ф. Силовая Электроника в системах электроснабжения переменного Тока, «Электричество» 2008. № 2
- [2] 邓隐北 降低供电系统中电流和电压非正弦度的混合式滤波器，《供电与用电》2008. NO 1
- [3] 邓隐北 改善电网供电质量的抗干扰技术,《变频器世界》2005. NO 6