

一种新型的低谐波静止无功补偿器介绍

李晓华, 厉吉文, 阎振坤, 芦洪涛

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 介绍了一种基于 VSC 和 PWM 技术的新型静止无功补偿器 (SVC Light)。理论分析证明, SVC Light 与 TCR 和 TSC 等其它静止无功补偿器 (SVC) 相比, 可以更快速、精确地补偿无功功率, 而且自身几乎不产生谐波; 从而有效地稳定系统电压, 缓解电压闪变。

关键词: 电压源换流器; 绝缘栅双极晶体管; 新型静止无功补偿器; 闪变

中图分类号: TM76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)22-0351-05

0 引言

随着现代工业的发展, 在工业现场出现了大量的冲击性负荷, 这些负荷的存在会引起电网电压闪变, 网损增加, 功率因数降低等问题, 如不采取有效措施, 不仅不能保证电力系统安全经济地运行, 而且会影响电气设备的正常工作, 严重时会造成电气设备损坏。无功功率补偿是解决以上问题的有效手段。但是传统的无功功率补偿器都存在着各自的缺陷, 例如: TCR 自身产生谐波大, 需要额外加装滤波器, TSC 不能连续调节, 灵活性差。此外, 这些补偿器大多采用可控硅作为投切组件, 响应速度有限, 无法满足无功功率快速补偿的要求。因此, 研制一种响应迅速, 自身几乎不产生谐波, 控制简单的补偿器成为研究人员普遍关注的课题。

1992 年, P. D. Zogas 提出了一种新型的 PWM 交流控制器结构, 这种交流控制器由标准的自关断单相开关组成, 运用 PWM 技术控制开关的导通和关断。该装置结构简单, 注入系统谐波含量小, 且门极控制容易实现。1994 年, Hua Jin 等人在此结构基础上提出了一种新的大型的 PWM 静止无功补偿器 (PSVC)。随着电力电子技术的发展, 一些大功率的可关断晶闸管 (例如 IGBT) 逐渐取代了可控硅来控制电抗器。在此基础上, ABB 公司开发出一种基于 PWM 技术, IGBT (绝缘栅双极晶体管), VSC (电压源换流器) 的新型静止无功补偿装置 SVC Light^[1]。通过本文理论分析证明, 装置的响应速度与 TSC、TCR 等采用相控技术的 SVC 相比大大提高, 可以使注入系统的谐波含量减小, 且能有效地缓解电压波动和闪变, 从而提高电能质量。

1 组成及原理

1.1 电压源换流器 (VSC) 原理

文献 [2~4] 中分析了电压源换流器的运行机理、应用及基于 VSC 的元器件对电能质量的影响。由高频开关器件 IGBT 构成的脉宽调制 (PWM) 式 VSC 换流器的单相电路如图 1 所示。

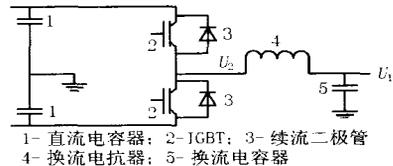


图 1 由 IGBT 构成的 VSC 换流器单相图

Fig. 1 Single-phase diagram of VSC based on IGBT

应用 PWM 技术, 在一定限度内可以通过改变 PWM 型式使 VSC 输出任意相角和幅值的电压, 它输出的有功功率和无功功率可以表示为

$$P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \theta \quad (1)$$

$$Q = \frac{U_1 U_2}{X} \cos \theta - \frac{U_1^2}{X}$$

式中: U_1 为母线电压, U_2 为 VSC 的电压, θ 为 U_1 与 U_2 之间的相角差, X 为换流电抗器的电抗。从等式 (1) 和 (2) 可以看出, 当母线电压和 VSC 电压之间的相角差为零 (即 $\theta = 0$) 时, VSC 可以看作一个纯电抗元件 (事实上, 为补偿 VSC 的损耗, 允许有小的相移)。进一步可以看出, 如果 $U_2 > U_1$, 则 VSC 发出无功功率, 即具有电容性。如果 $U_2 < U_1$, 则 VSC 吸收无功功率, 即它具有电感性。VSC 可控电压源如图 2 所示。

1.2 绝缘栅双极晶体管 (IGBT)

IGBT 是一种可以自关断的半导体组件, 只需要用很小的功率进行控制。与用控制换向晶闸管的功率相比较, 其功率只需要用缓冲器电路提供, 这就使

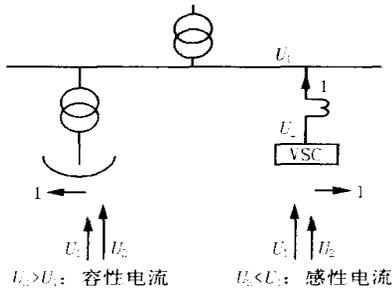


图2 VSC可控电压源

Fig. 2 VSC: a controllable voltage source

串联成为可能,甚至在 kHz 级换向频率范围内都具有很好的电压分布。IGBT 技术发展很快,其额定电压已经达到 2.5 kV,而且有望实现更高的额定电压。

1.3 脉宽调制(PWM)技术

应用 PWM 技术,在一定限度内可以通过改变 PWM 型式获得任意相角和幅值,这一过程几乎是瞬间完成的。由于 PWM 允许单独控制有功功率和无功功率,使得 VSC 非常接近于理想的输电网中的一个分支。从系统角度来看,它可以看成是一个无转动惯量的电动机或发电机,几乎能够瞬时控制有功功率和无功功率。

SVC light 采用的是由 IGBT 器件构成的中点钳位式三电平 VSC,主电路如图 3 所示,从图 3 中可以看出,将两电平 VSC 主电路结构改造为相同电压等级的三电平 VSC,只需在每相桥臂上增加两个二极管进行中点钳位即可。并联电容器组为 VSC 提供电压支撑,起到直流电压源的作用。三电平 VSC 虽然在控制上要比两电平 VSC 复杂些,但与两电平 VSC 相比,同等开关频率下的三电平 VSC 的交流侧电压谐波含量更小,且响应速度更快,因此三电平 VSC 容量可以做的更大。

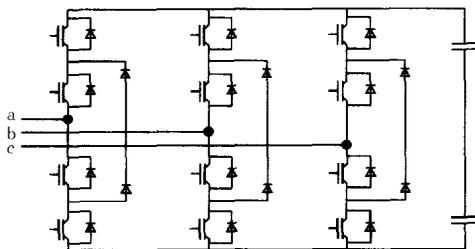


图3 三电平电压源换流器

Fig. 3 Three-level converter of voltage source

利用 PWM 技术,不需要滤波器装置,VSC 就能发出较理想的接近正弦波波形的电压。

由于 VSC 的开关频率很高,IGBT 可以串联在线路中。这就使 VSC 可以直接连到几万伏的高压系

统中,因此,通过 IGBT 的串联,不需要其它装置,我们就可以获得几十 Mvar 到 100 Mvar 的补偿容量。

SVC Light 是基于三电平 VSC 和 IGBT,利用 PWM 技术的动态补偿器,它的开关频率可以达到 1600 Hz,起到了有源滤波器的作用。

VSC 在 SVC Light 中的作用是一个完全可控的电压源,它的电压和系统电压的相角和频率完全匹配,它的电压幅值可以连续快速地调节。VSC 通过一个小电感与系统相连。

2 应用实例

在瑞典的 Uddeholm Tooling 钢厂安装了一套额定容量为 44 Mvar 的 SVC Light 补偿装置^[5],目的是为了提提高周围电网的电能质量。目前,此装置运行良好。钢厂内有一套电弧炉(EAF)设备,额定容量为 31.5 MVA 且有 20% 的过载能力(31.5/37.8 MVA);一套 LF 设备,额定容量为 6 MVA 且有 30% 的过载能力(6/7.7 MVA)。电网公共连接点的电压水平为 132 kV,最坏情况下的故障水平也不会超过 1000 MVA。如图 4 所示。

因为电弧炉的存在,钢厂中将产生大量的电压闪变和谐波,影响了电能质量。过去,人们并没有认识到这个问题的严重性,但随着社会的发展,越来越多的精密仪器的使用,对电能质量的要求越来越高,人们对这个问题也逐渐变得重视起来。

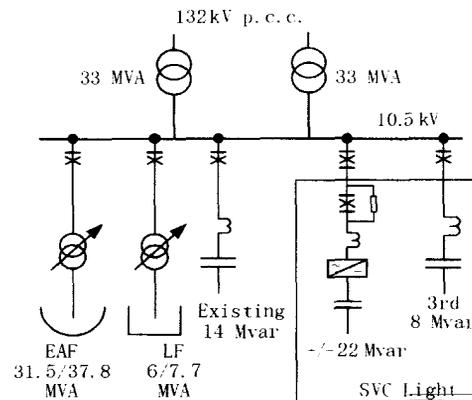


图4 Uddeholm Tooling 钢厂的 SVC Light 单线

Fig. 4 Single-line diagram of SVC light in Uddeholm Tooling steel plant

SVC light 包括一个额定功率为 8 Mvar 的可调滤波器组和一额定功率为 +/- 22 MVA 的 VSC。同时,还有一组已有的容量为 14 Mvar 的滤波器。VSC 通过电感直接连接到 10.5 kV 的交流电压母线上。SVC Light 的无功功率范围是从 0 到 44 Mvar。由于

VSC 既能发出功率,又能吸收功率,故电容器组和 VSC 的容量取 SVC Light 总容量的一半即可。

SVC Light 优于其它可选装置还因为它能有效地缓解电弧炉等设备引起的家庭或办公场所照度的波动和闪变。

2.1 VSC 的控制

为有效消除闪变,我们利用控制算法计算 VSC 所需输出电流的大小^[5],在此过程中,需要用到电弧炉电流和母线电压。为快速控制 VSC 的瞬时电流,利用了通过耦合电感的电压时间域(voltage - time area)的概念,即通过控制电感线圈上的电压时间,就可以得到通过电感的期望的电流。

电感线圈电压由母线电压和 VSC 发出的电压组成。其中,我们可以通过控制 PWM 来控制 VSC 发出的电压,从而获得期望的电流。

2.2 功率因数的提高

假设补偿后的功率因数目标值为 0.98,则投入 SVC Light 后,功率因数由原来的 0.70 增加到接近于 1。对传统的 SVC,TCR 的容量 Q_{TCR} 和滤波电容器组的容量 Q_C 均应为 44 Mvar。但由于 VSC 既能发出功率,又能吸收功率,故电容器组和 VSC 的容量都可以做的较小,只有相应的 SVC Light 容量的一半就可满足要求,与传统 SVC 相比,降低了投资成本。同时,它不仅能迅速地补偿电弧炉所需的无功功率,还在每个周期内瞬时补偿了波动的有功功率,使一个周期内的平均值为零。这种瞬时提供有功功率补偿的特性传统 SVC 是不具备的。

2.3 闪变的缓解

电压波动常会引起许多电工设备不能正常工作。为此,选择白炽灯的工况作为判断电压波动值是否被接受的依据^[6]。因为闪变是人对照度波动的主观视感,反映了电压波动引起的灯光闪烁对人视感度产生影响的效应。“闪变”不仅和电压波动大小有关,而且和波动的频率(即对工频电压的调幅频率)、照明灯具的性能及人的视感因素有关。研究表明,人眼对 8.8 Hz 左右的电压波动频率最为敏感。由于人们视感的差异等因素,决定闪变的因素也就颇为复杂。正因为如此,经国际电热协会(UIE)和国际电工委员会(IEC)多年协调,电压闪变的国际电工标准已在力求统一。

电压波动引起照度波动对人的主观视觉反应称为瞬时闪变视感度(instantaneous flicker sensation level)。通常以闪变觉察率 50% 作为瞬时闪变视感度

的衡量单位,即定为 $S = 1$ 的觉察单位。短时间闪变严重度 P_{st} 是对一段时间(至少 10 min)电压分析,由闪变统计计算得到。长时间闪变严重度 P_{lt} 统计时间需在 1 h 以上,典型取 2 h。

工作人员在电网公共连接点对闪变消除的程度进行了在线测量,没有安装 SVC Light 时的闪变严重程度指数的统计结果为 $P_{stA}(95\%) = 3.73$,安装补偿器以后的闪变严重程度指数的统计结果为 $P_{stB}(95\%) = 0.64$ 。则得到闪变消除的指数为:

$$R_{SVC\text{Light}} = \frac{P_{stA}}{P_{stB}} = 5.8$$

对闪变的消除,文献[7]中利用计算机仿真也得到了期望的结果。

电弧炉支路的电流是不稳定、不平衡和畸变的,而且也是迅速变化的,电弧炉支路电流在相位上落后于电压。随着电弧炉支路电流的变化,SVC Light 迅速响应,从而抑制了电压闪变。响应速度非常快,响应时间主要受开关频率和电感大小的影响。

2.4 有源滤波

由于采用了 PWM 技术,VSC 的响应速度很快,可以把它看成是一个有源滤波器。因此可以有效地减小系统中的谐波,从而提高了电能质量。

3 其它

安装 SVC Light 的一个最基本的原因是它能够补偿无功功率,提高功率因数;减轻电压波动和闪变;减少供电母线电压波动和滤波功能;另外,它还有减轻三相负荷电流不对称,降低过电压,提高系统的静态和动态稳定性的功能。不仅钢铁工业可以从 SVC Light 得到益处,电力系统也可以利用它来提高电能质量。基于 VSC 的 SVC Light 还有以下优点: VSC 电路简单,布置紧凑,牢固的机械设计,可将换流器设备封闭在简单的模块结构中。模块式设计,设备能预先在工厂里安装好,在装运前可做完预先应该做的各种试验。技术上的简化,如滤波器小,不用变压器,开关设备少,减少了土建工程等,因而易于处理。具有损耗小、易维护、噪声小、响应速度快、调节连续灵活等特点。

4 结论

通过上述理论分析,可知 SVC Light 系统具有许多传统 SVC 系统无法比拟的优点。虽然目前

(下转第 75 页 continued on page 75)

Present status and development of PD online monitoring system in power transformer

ZHANG Yancang¹, ZHANG Yir-gang², XU Da-ke¹

(1. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd, Nanjing 210003, China; 2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The research on PD online monitoring system in power transformer is expounded. Several PD detecting methods are evaluated by studying data acquiring, noise rejection, PD localization and data analysis. It points out that, traditional PD detection methods have some disadvantages, such as low measured frequency band, less obtained information and easily interfered from background. Ultrahigh frequency detection also has several disadvantages such as narrow measured band, and losing some characteristic peaks of discharge. Comparing with traditional and ultra-high frequency of PD detection, ultrawideband detecting technique with high measured frequency and wide detected band is helpful to obtain much more information. The characteristics of PD can be studied in the range of ultrawideband in detail. As a result, its prospect and some present research objects are summarized.

Key words: transformer; PD (partial discharge); online monitoring

(上接第 53 页 continued from page 53)

VSC 仍然有一些问题有待解决(如: 阀电压、屯流承载能力较低等),但随着电力电子技术的进一步发展,IGBT 等具有自关断能力的元件的额定容量将不断提高,性能将不断改进,价格将不断降低。因此, SVC Light 作为一种新型的无功功率补偿器,具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] Grunbaum R. SVC Light: a Power Means for Dynamic Voltage and Power Quality Control in Industry and Distribution [J]. Eighth International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, 2001, 475:404-409.
- [2] 马林,俞晓荣,等(MA Lin, YU Xiaorong, et al). 电压源型 AC/DC 换流器的运行机理和特性分析 (Operational Mechanism and Characteristics Analysis of Voltage Source AC/DC Converters) [J]. 继电器 (Relay), 2002, 30(10):47-50.
- [3] 王凤川 (WANG Fengchuan). 电压源换流器式轻型高压直流输电 (Light-HVDC Based on Voltage Sourced Converters) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 1999, 23(4):74-76.
- [4] 束洪春,王晶,等 (SHU Hongchun, WANG Jing, et al). VSC 的 FACTS 元件对动态电能质量的影响 (Study on

Impacts on VSC-based HVDC Upon Dynamic Power Quality)

[J]. 华北电力大学学报 (Journal of North China Electric Power University), 2003, 30(3):1-8.

- [5] Grunbaum R. Enhancing of Power Quality and Availability in Distribution System by Means of Voltage Source Converters [A]. 16th International Conference and Exhibiton on IEE. 2001. 2:18-12.
- [6] 高师湃,等 (GAO Shi-pai, et al). 闪变测试系统研究 (Study on Voltage Flicker Measurement Systems) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2002, 22(5):22-25.
- [7] Larsson T, Grunbaum R. SVC Light: A Utility's Aid to Restructuring Its Grid [J]. Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE. 2000. 4:2577-2581.

收稿日期: 2004-03-18; 修回日期: 2004-05-21

作者简介:

李晓华(1974-),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统无功补偿和电压无功优化; E-mail: lixiaohua96@126.com

厉吉文(1962-),男,教授,博士生导师,从事电力系统无功补偿和电压无功优化方面的研究工作;

阎振坤(1979-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统无功补偿和电压无功优化。

A novel low-harmonic static reactive power compensator

LI Xiaohua, LI Jiwen, YAN Zhenkun, LU Hongtao

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The paper describes a new product on the market: SVC Light, which is a reactive power compensator based on the VSC and PWM technology. The performance of SVC Light superior to other available applications is: compensating reactive power quickly and exactly almost without producing harmonics, which can keep power system voltage steady, and mitigate voltage flickering.

Key words: VSC; IGBT; SVC Light; flicker