

Summary of Three-Phase Unbalanced Devices Compensation

Meng Liu, Dunxin Bian, Xiao Zhang, Wei Li, Ming Lu

School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo Shandong
Email: 904420080@qq.com

Received: Jul. 16th, 2016; accepted: Aug. 8th, 2016; published: Aug. 15th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The three-phase power system unbalance seriously affects the quality of power supply and the safe operation of electrical equipment, so that power consumption increases. For the current unbalance compensations, this article analyzed each compensation's principle, structure and development prospects, and given the range of applications and the unbalanced compensations' development trend based on the advantages and disadvantages of each compensation device.

Keywords

Three-Phase Unbalanced, Power Quality, Unbalance Compensation Means, Static Var Compensator

三相不平衡补偿装置综述

刘 萌, 边敦新, 张 潇, 李 伟, 逯 明

山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博
Email: 904420080@qq.com

收稿日期: 2016年7月16日; 录用日期: 2016年8月8日; 发布日期: 2016年8月15日

摘 要

电力系统中的三相不平衡严重影响供电质量, 使得电能损耗增加, 并影响用电设备的安全运行。本文针对目前出现的不平衡补偿装置, 对各补偿装置的原理、结构、发展前景进行分析比较, 给出基于各补偿

装置优缺点的应用范围以及未来不平衡补偿装置的发展趋势。

关键词

三相不平衡, 电能质量, 不平衡补偿装置, 静止无功补偿器

1. 引言

近年来, 伴随我国经济的发展, 配电网中的负荷日益增多, 给电网的运行带来巨大压力。与此同时, 用户端存在的大量的单相负荷使得柱上的三相电网不平衡, 严重威胁电网的安全运行。当系统发生三相不平衡时, 会产生大量的负序电流及零序电流, 严重影响供电质量。此时, 配变设备会出现出力降低, 电能损耗增加; 此外, 三相不平衡还会影响用电设备安全运行, 降低设备利用率, 减损设备寿命并极易引起保护装置的误动作。

随着电力电子技术的不断发展, 针对电力系统中三相不平衡的补偿方式也在不断进步, 补偿效果更加高效。先后出现电容补偿器、同步调相机、静止无功补偿器和静止无功发生器。

2. 三相不平衡补偿装置介绍

2.1. 电容补偿器

电容补偿器作为最早的不平衡补偿装置, 是电网中用得较多的一种专用的无功功率补偿设备[1]。其基本原理是把感性功率负荷与具有容性负荷的装置并联, 当感性负荷释放能量时, 容性负荷吸收能量; 而容性负荷释放能量时, 感性负荷则吸收能量, 这样, 能量便可在两种负荷间互相转换, 由此, 感性负荷所吸收的无功功率便可由容性负荷输出的无功功率补偿[2]。文献[3]对电容器的原理与应用做了更加详细的说明。

电容补偿器具有原理简单、价格便宜、安装、运行和维护方便的优点。但其只可以补偿感性无功, 并对系统中的高次谐波有放大作用, 不能对系统进行连续调节[4]。电容器的无功功率调节特性相对于其他产品还是较差的, 所以也逐渐被其他产品所替代[5]。图1是电容补偿器串联在电路中的模型。

2.2. 同步调相机(SC—Synchronous Compensator)

调相机出现较早, 作为一种传统无功补偿装置, 其可在不带机械负荷的情况下, 通过励磁或欠励磁方式来运行[6]。作为专门用以产生无功功率的同步电机, 在过励磁或欠励磁的不同情况下, 可分别发出大小不同的容性或感性无功[7]。当系统出现电压偏低, 调相机会通过励磁运行来供给系统无功功率, 从而调高系统电压; 而当系统电压偏高, 调相机又会通过欠励磁运行来吸收系统过多的无功功率, 从而降低系统电压。它能够实现双向、独立、连续的调节无功的大小, 并具有较强的过载能力[8]。图2为同步调相机原理图。

此外, 同步调相机对维持负荷中心的电压水平和调节负荷中心的无功功率平衡有较强的补偿控制功能[8]。由于电力系统中的发电、输电、配电和用电必须同时完成, 要求系统时刻处于动态平衡, 因此要求系统不平衡无功补偿装置响应迅速, 如达到周波级的响应速度, 才能便于系统问题的处理; 同时由于同步调相机是旋转设备, 运行维护复杂, 响应速度慢, 且随着负荷中心地区对环境要求的提高, 旋转设备带来的噪声问题也成为其一大缺点[9]。图3为步调相机运行曲线图。

2.3. 静止无功补偿器(SVC)

静止无功补偿器是于20世纪70年代兴起的一种补偿装置, 现在已经发展成为很成熟的FACTS装置,

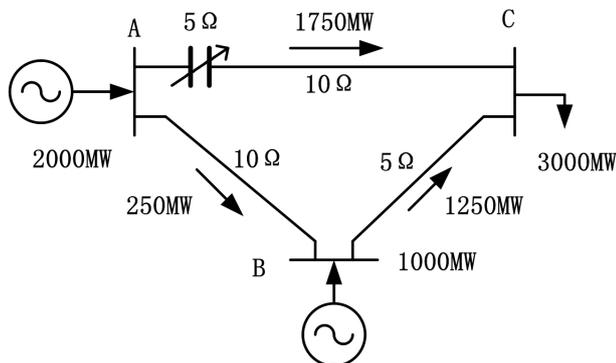


Figure 1. Series capacitor compensation

图 1. 串联电容补偿

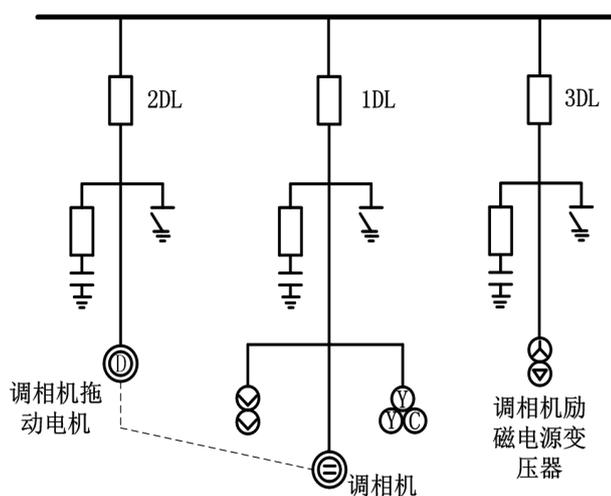


Figure 2. Synchronous phase modulation schematic

图 2. 同步调相机原理图

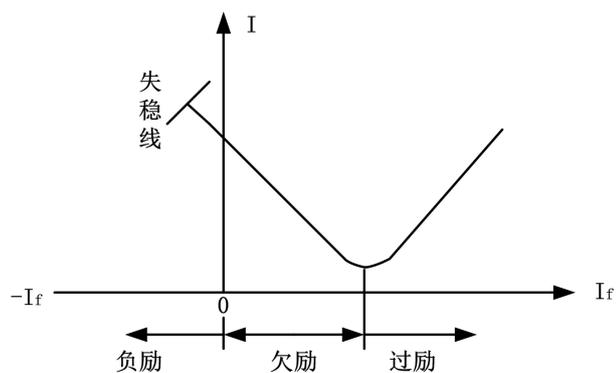


Figure 3. Synchronous condenser operation curve

图 3. 同步调相机运行曲线

被广泛应用于现代电力系统的负荷补偿和输电线路补偿。SVC 主要通过控制不同的静止开关来投切电抗器或电容器，使装置具有发出或吸收无功电流的功能，从而有效提高系统的功率因数和系统电压的稳定性，并能够明显抑制系统振荡。

目前的静止无功补偿装置一般是指使用晶闸管的无功补偿设备，主要有以下四种类型：

2.3.1. 具有饱和电抗器的静止无功补偿装置(Saturated Reactor—SR)

饱和电抗器可简单地视为一个具有磁饱和特性的线圈。其运行原理为：当与电抗器串联的电力电子开关导通时，电流从零开始逐步增加，在电流较小时，电抗器工作在不饱和区，随着电流的继续增大，电抗器的铁心逐渐达到磁饱和。在假定回路中的总电阻保持不变的条件下，不饱和时由于电感较大，则时间常数(L/R)也较大，电路呈现较大感性，阻碍电流上升；在饱和区域，电抗值变小，时间常数也较小，电路电感特性不明显，电流流通较为顺畅，从而达到了在小电流时限制电流变化率的作用[10]。

SR 型 SVC 通常分为可控饱和电抗型与自饱和电抗型。

自饱和电抗型能够通过电抗器自身的调节来稳定电压，在调节时，它能够利用铁心自身的饱和特性，使得滞后相位无功功率的大小与端电压的升降成正比。图 4 是带斜率校正的自饱和电抗器型静止补偿装置的原理图及该装置的工作特性曲线[11]。

图中 C 为固定电容器组，Cs 为斜率校正电容，Ls 为自饱和电抗器。从图 4 中可知，当母线电压升高 ΔU 时，则按特性曲线滞后的电流增加 ΔI ，该增加的电流会在网络电抗 X_s 上产生压降 ΔU ，从而保持系统电压不变；反之，当母线电压下降 ΔU 时，则超前电流增加 ΔI ，该电流在网络电抗 X_s 上产生压升 ΔU ，从而维持系统电压不变。该装置对电压波动的响应速度较好，响应时间一般在 10~20 ms。缺点是电抗硅钢片需达到饱和状态，因而使铁心损耗增大，并伴有振动和噪声[12]。

可控饱和电抗器型静止无功补偿装置原理图如图 5 所示。该型补偿装置能够改变饱和电抗器控制绕组中的电流大小，使绕组中的感抗发生变化，从提供所需补偿的无功功率值。可控饱和电抗器较自饱和电抗型能够更好的应用于母线电压波动较大的情况，但其振动和噪声仍较大[13]。

正常情况下，该电抗器运行在高磁饱和状态，电抗器所呈现的动态电抗一般是绕组的漏抗，因此时间常数很小，具有较快的响应速度[14]。

与同步调相机相比，饱和电抗器的响应速度快，具有静止型的优点。但由于其工作时铁心需达到磁饱和状态，会产生较大的损耗和噪声，且不能对系统进行分相调节，所以未能成为静止无功补偿装置的主流[14]。

2.3.2. 晶闸管控制电抗器(Thyristor Control Reactor switch capacitor—TCR)

晶闸管相控电抗器(TCR)是 SVC 的最重要组成部件之一，IEEE 将 TCR 定义为：一种并联型晶闸管控制电抗器，通过控制晶闸管的导通时间，它的有效电抗可以连续变化。单相 TCR 的电路结构如图 6 所示，将两个反并联的晶闸管与一个电抗器相串联，反并联的一对晶闸管就像一个双向开关，一个晶闸管在供电电压的负半周期导通，另一个晶闸管在供电电压的正半周期导通。晶闸管的触发角 α 在其两端口之间的电压的过零点时刻作为计算的起点[15]。

TCR 型静止无功补偿装置的原理图及装置的基频电压-电流特性曲线如图 5 所示。当 TCR 投入电网后，通过对反并联的晶闸管对的移相触发脉冲进行控制，使得电抗器的等效电纳发生变化，进而输出连续的、可变的无功功率[16]。该电路即相当于电感负荷的交流调压电路结构。其中电抗器为储能元件，即产生可调感性无功，达到调节感性无功的作用[17]。

整个 TCR 的作用就像一个连续可调的电感，仅能够吸收无功，一般通过增加固定的并联电容器组来扩充整个装置的补偿范围到超前和滞后的两个象限中。但是 FC-TCR 有一个明显的可调性范围，若超出该范围，FC-TCR 就变成固定电容器或固定电抗器了。由于 TCR 运行时会产生大量的谐波，因此在选用 TCR 时需为系统加装滤波器装置[5]。通常将 SVC 与无源滤波器并联，但这样不仅会增加成本，而且在实际运行时，有可能由于系统发生或接近于谐振而使某些谐波严重放大而不是衰减。另外，由于 SVC 的工作范围较窄，当系统电压降低到一定程度时，输出无功将随着电压降落而降落，不能对系统提供持续有效的支持[18]。因此目前通常将 FC 设计成具有双重功能，既补偿功率因数，又具有滤波功能。

在实际电网中用于三相电路时，一般电抗器组一般也是进行三相多组投切，接法可以为三角形接法，

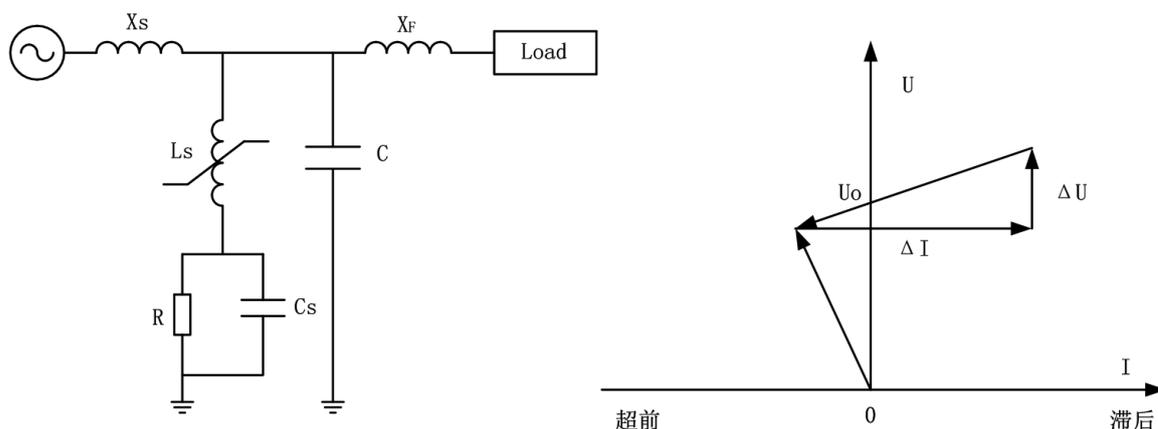


Figure 4. Static Var Compensator of self-saturation reactor with slope correction and operating characteristic curve
图 4. 带斜率校正的自饱和电抗静止无功补偿器及工作特性曲线

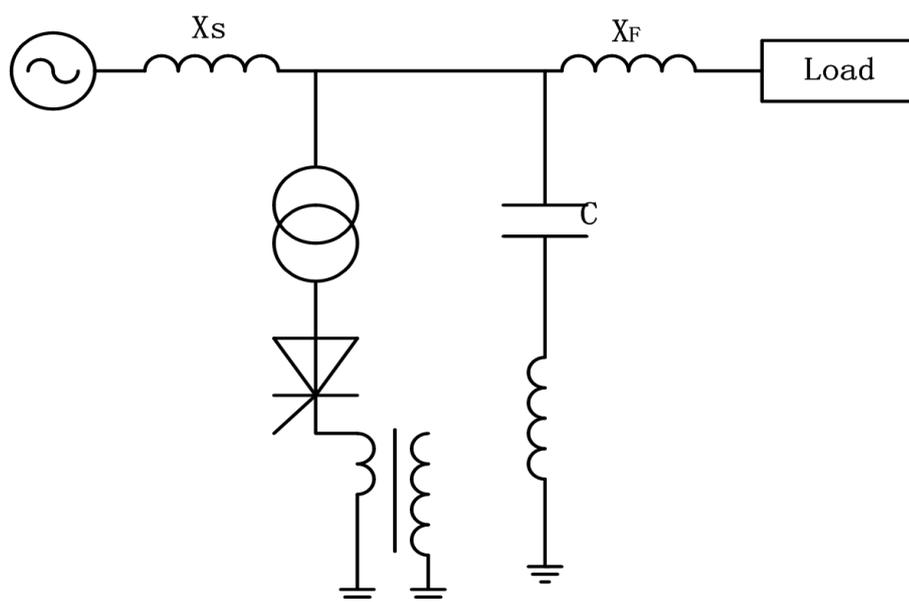


Figure 5. Static Var Compensator device of Controllable Saturable Reactor type schematic
图 5. 可控饱和电抗器型静止无功补偿器装置原理图

星形接法[19]。

2.3.3. 晶闸管投切电容器(Thyristor Control Capacitor—TSC)

与 TCR 相比, TSC 运行时不产生谐波, 损耗较小, 因此在电力系统中获得了有效应用, 但 TSC 不具有动态补偿三相不平衡的能力, 且不能连续调节无功[19]。

在 TSC 结构中, 两个反并联晶闸管能够实现电容器与电网的接通或关断, 其结构中串联的小电感性用来抑制电容器投入电网时产生的冲击电流。当电容器运行时, TSC 的电压-电流特性与该电容的伏安特性一致。在实际工程当中, 一般将电容器分成几组, 如图 7 所示, 每组都可单独由晶闸管投切, 并可根据电网的无功需求对电容器进行投切, 实际上 TSC 可看做具有分级可调的吸收容性无功功率的动态无功补偿器, 其电压-电流特性如图 7 所示, 按照投入电容器组数的不同可为图中三条不同的斜线。当 TSC 用于三相电路时, 其连接方式选 Y 联结或 Δ 联结均可, 每一组都可以设计成如图 7 所示的自由分组投切形式[15]。

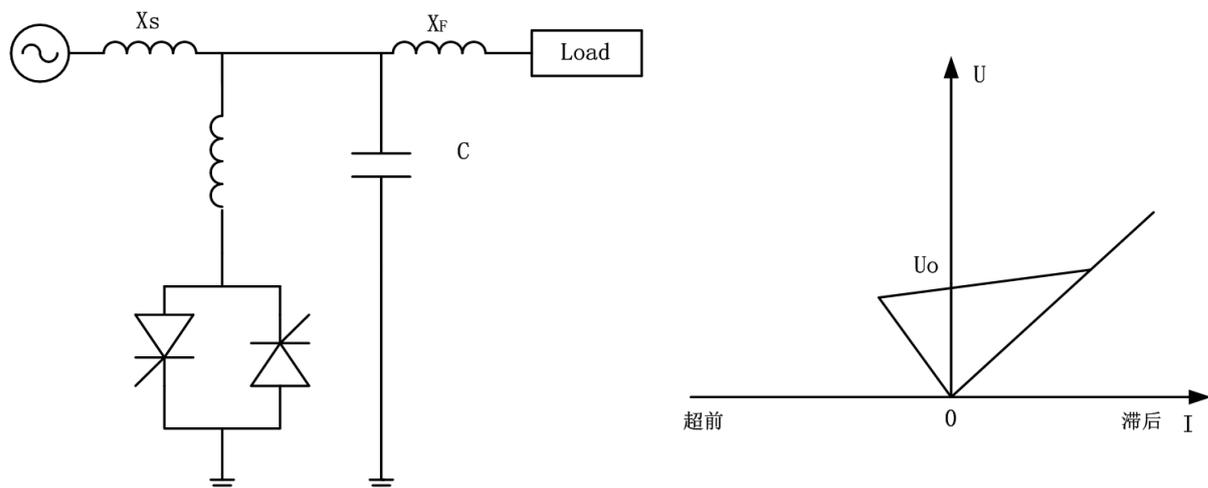


Figure 6. Static Var Compensator device of Thyristor Phased Controlled Reactor schematics
图 6. 晶闸管相控电抗型静止无功补偿装置原理图

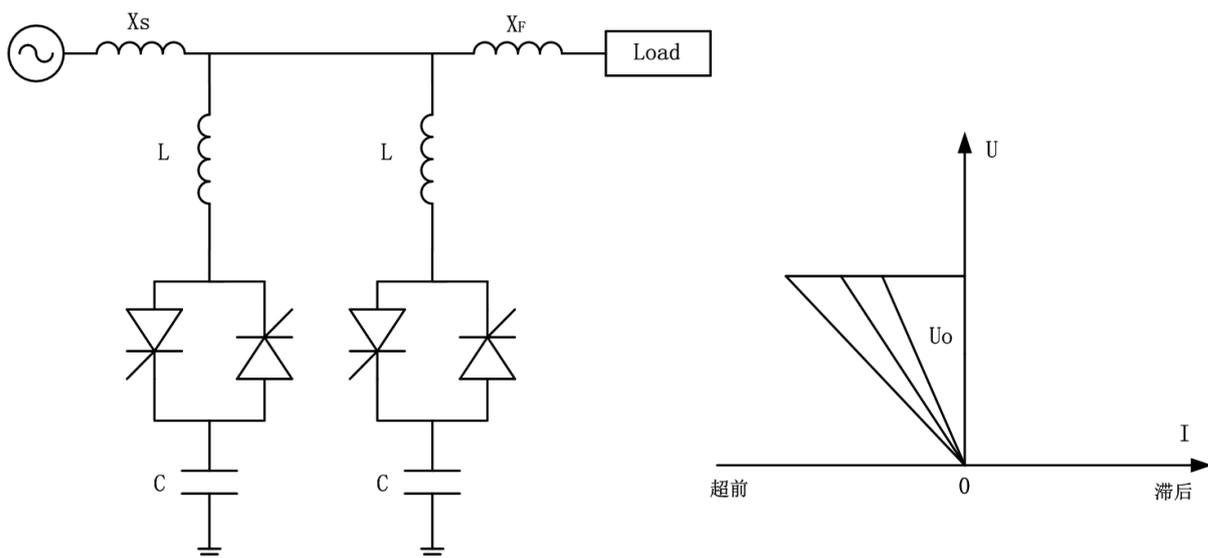


Figure 7. Static Var Compensator device of Thyristor Switched Capacitor type schematic and the operating characteristic curve
图 7. 晶闸管投切电容器型静止无功补偿装置原理及工作特性曲线

图 7 所示为 TSC 型静止无功补偿装置原理图及电压 - 电流特性曲线。根据负载感性无功功率的变化, 切除或投切电容器组时, 晶闸管只作为投切电容的开关, 而不像 TCR 型中的晶闸管起相控的作用。在实际运行系统当中, 为降低系统电流晶闸管产生的冲击, 并避免与系统阻抗产生的谐振, 需要在电容器组中串联阻尼电抗器。在一定范围内对晶闸管投切电容器组时, 通常将过零点或系统电压峰值作为晶闸管投切的必要条件。除此之外, 因 TSC 中的电容器只在额定正弦电流和零电流之间切换, 在系统运行时不会产生谐波。但其响应速度较差[19]。

2.3.4. TCR+TSC 混合型

TCR + TSC 型 SVC 由若干个 TSC 单元和一个 TCR 单元并联组成。电容器可以实现分级投切, 但在每个分级之间的无功可以通过 TCR 实现连续调节。SVC 最大的感性调节范围与 TCR 容量一致。TSC 支路通过串联电抗器被调谐在不同的主导谐波频率上。TCR 和 TSC 通常设计成三角形接线方式, 可单独对

每相 TCR 和 TSC 支路的触发角进行控制，从而达到分相调节无功的目的[19]。

TCR + TSC 混合型 SVC 原理及电压 - 电流特性曲线 8 所示。TCR + TSC 型 SVC 一般由多组电容器和一组晶闸管相控电抗器组合，根据系统需要，补偿系统所需的无功[20]。在运行电压高于系统电压时，通过调整投入系统的电容器组数，来补偿一定的容性无功，再通过晶闸管相控电抗器的感性无功功率对过补偿的容性无功进行抵消；在运行电压低于系统电压时，切除所有接入系统的电容器组，此时系统中只有 TCR 装置运行[21]。

TCR + TSC 型 SVC 的单相结构如图 8 所示，根据装置的晶闸管参数、容量、谐波影响、成本等因素而由 n (n 为正整数)条 TSC 支路(或者是容性滤波支路)和 m (m 为正整数)条 TCR 支路构成，图中 $n = 1$ ， $m = 1$ ，各 TSC，TCR 参数一致。通常，TCR 支路的容量稍大于 TSC 支路的容量[22]。

这种型式的 SVC 装置，TCR 的运行特性会“插入”电容器特性之间。如果 TCR 的特性有一个小的正斜率，则合成的特性将如图 8 中的实线所示。从图 7 中可知，TCR 的电流额定值应当稍大于一组电容器在额定电压下的值，否则就会得到上图阴影所示的死区[22]。

2.3.5. 静止同步补偿器(STATCOM)

80 年代以来，一种更为先进的静止型无功补偿装置出现了，这便是采用自换相变流电路的静止无功补偿装置，称之为静止同步补偿器(STATCOM)，或者静止调相机(Static Condenser-STATCOM)。STATCOM 不仅可用于输电系统中，也可用于配电系统中。此时，其亦称为 D-STATCOM (Distribution STATCOM)，作用是提供或吸收无功功率，维持母线电压稳定，必要时还看滤除负荷产生的谐波。目前，世界各国对静止同步补偿器的研究方兴艾[23]。图 9 为静止同步补偿器原理图。

静止同步补偿器是由基于 GTO，或 IGBT 的电压型逆变器和直流电容器构成的，是现代柔性交流输电系统(FACTS)的核心组成部分，同常规的静止无功补偿装置相比，STATCOM 具有以下几大优点[23]-[30]：

- (1) 连接电抗小，谐波量小，能显著提高系统的暂态稳定性并降低阻尼系统振荡；
- (2) STATCOM 装置采用直流电容器代替交流电容器，使 STATCOM 装置的体积减小，损耗降低，不仅可调节系统的无功功率，还可调节系统的有功功率；
- (3) 对系统电压进行瞬时补偿，即使系统电压降低，其仍可维持最大无功电流，并能够输出稳定的系

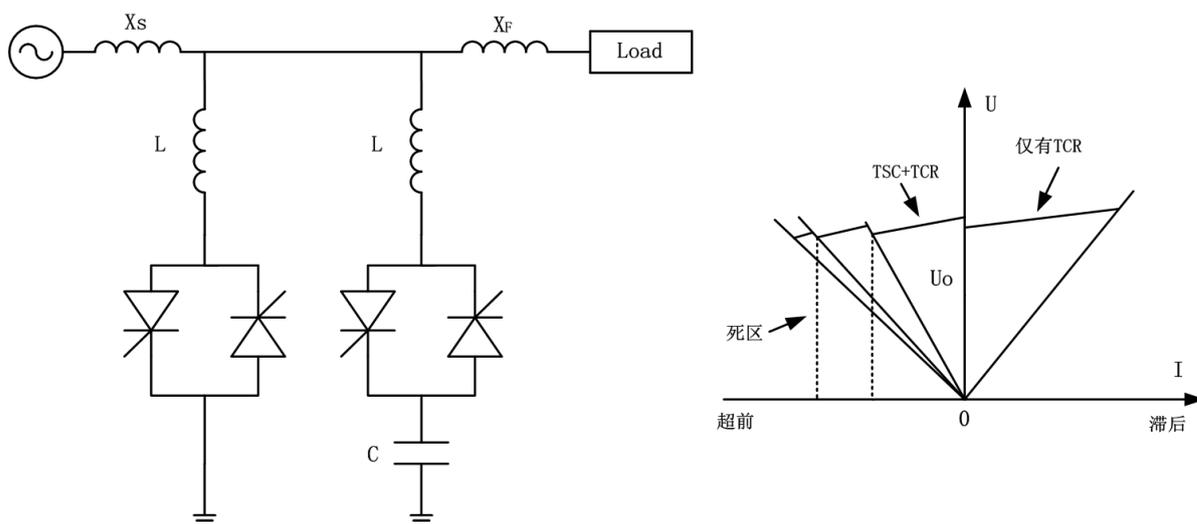


Figure 8. Static Var Compensator of (TCR + TSC) hybrid type schematic and the possible operating characteristic curve
图 8. (TCR + TSC)混合型静止无功补偿装置原理图和可能的工作特性曲线

统电压；

(4) 静止运行，控制灵活，调节范围广，安全稳定，无磨损、无机械噪声，大大提高了装置寿命，改善环境影响；

2.4. 静止无功发生器(SVG—Static Var Generator)

近年来电力电子技术得到了迅猛发展，使得基于 GTO 电压型变流器的新型静止无功发生器进入了实用阶段，由此，采用自换相交流技术的静止无功补偿装置——新型静止无功发生器(Static Var Generator—SVG)开始进入人们的视线。图 10 为 SVG 的基本构成，它由 GTO 电压型变流器、直流电容和与系统连接的变压器构成，SVG 的电压电流特性曲线在下图中一并给出[31]。

由电力电子变流装置的相关特性可知，当系统电压小于 SVG 的输出电压时，SVG 相当于电容器，能够吸收超前的无功功率；当系统电压大于 SVG 的输出电压时，SVG 相当于电抗器，能够发出超前的无功功率；当系统电压与 SVG 的输出电压相等时，系统与 SVG 之间不会产生无功功率的交换。因此，SVG 能够兼顾谐波抑制与无功补偿，并且没有功率损耗[32]-[34]。

目前我国对 SVG 的建模、结构设计、控制模式以及不对称控制等都做了相关的研究，但将这些技术

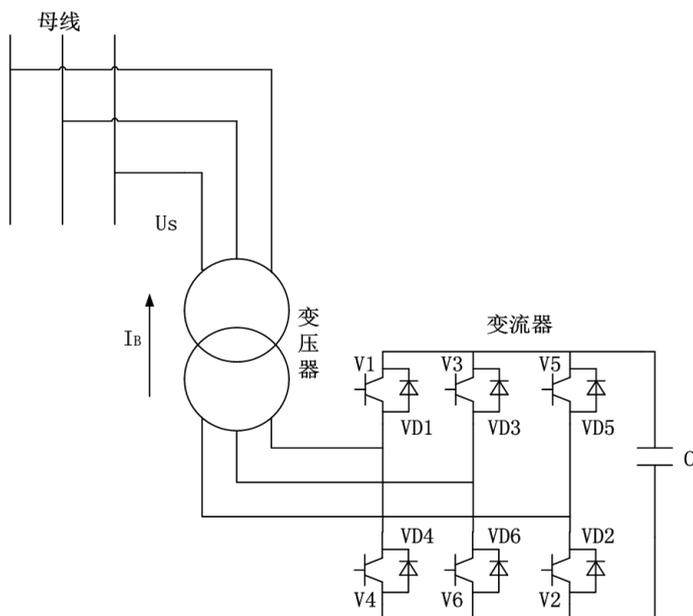


Figure 9. Static synchronous compensator schematic

图 9. 静止同步补偿器原理图

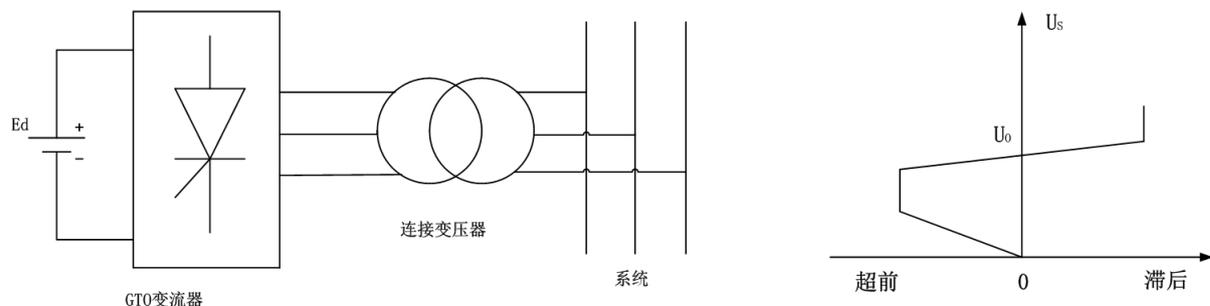


Figure 10. SVG system schematic and SVG voltage-current characteristic curve

图 10. SVG 系统原理图和 SVG 电压 - 电流特性曲线

Table 1. Unbalance compensations' feature comparison
表 1. 各不平衡补偿器特点比较

性能	电容补偿器	同步调相机	静止无功补偿器					SVG
			SR	TSC	TCR	TCR+TSC	STATCOM	
调节范围	超前	超前/滞后	超前/滞后	超前	超前/滞后	超前	超前/滞后	超前/滞后
控制方式	不连续	连续	连续	不连续	连续	连续	连续	连续
调节灵活性	差	好	差	好	好	好	好	很好
响应速度	慢	慢	快	快	快	快	快	最快
调节精度	差	好	好	差	好	好	好	最好
产生高次谐波	多	少	少	无	多	多	少	少
控制难易程度	简单	简单	简单	稍复杂	稍复杂	稍复杂	复杂	复杂
技术成熟程度	好	好	好	好	好	好	好	一般
噪声	小	大	大	小	小	小	小	小
分相调节	不可以	有限	不可以	有限	快	可以	可以	可以
单位投资	小	大	中等	中等	中等	中等	稍大	大

应用于实际当中还存在一定的问题，如：SVG 的复杂结构、高难度控制过程、以及较高的生产成本等。如要将 SVG 应用于实际电力系统中，这些问题都亟需解决[31]。

3. 结论

目前，已出现的主要不平衡补偿器特点如表 1 所示。

截止目前，三相不平衡补偿器的发展已基本能够满足电网运行需求，目前主流的不平衡补偿器在响应速度、补偿精度、谐波抑制方面已取得长足进步。如今，电容补偿器、调相机因其调节精度及响应速度方面的劣势正逐步退出历史舞台。SVC 正成为电网三相不平衡补偿的首选装置，以其快速的响应，适中的价格，在工业领域和输配电领域达到了前所未有的高速发展。STATCOM 作为一种新型的无功补偿调节装置，已经成为现代无功补偿装置的发展方向，因而已成为国内外电力系统行业的重点研究课题之一。对于 SVG，虽然具有其它补偿装置难以比拟的各项优势，但其技术尚处于起步阶段，实用化仍需要一段时间。

参考文献 (References)

- [1] 汪蕾. 配变三相不平衡全电容调节补偿的研究[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(6): 5.
- [2] 周虎. 35 kV 以下变电所电容补偿器选择原则与补偿容量测定[J]. 中国新技术新产品, 2013(8): 2.
- [3] 陈建业. 晶闸管控制的串联电容补偿器的原理与应用[J]. 国际电力, 2004, 8(3): 6.
- [4] 孙宏国. 低压系统可控并联电容补偿器的设计[J]. 电工技术杂志, 2004, 1(1): 4.
- [5] 葛俊. 可控串联电容补偿器的负阻尼特性研究[J]. 电力系统自动化, 2001(23): 4.
- [6] 付延婷. 不平衡负荷的静止无功补偿装置的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学.
- [7] 张自评. 同步调相机运行方式的分析[J]. 华中电力, 1993, 6(2): 4.
- [8] 马大强. 同步调相机对电力系统静态稳定的影响[J]. 电机工程学报, 1998(3): 12.
- [9] Hsu, S.-M. and Czarnecki, L.S. (2003) Adaptive Harmonic Blocking Compensator. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **18**, 895-902 <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2003.813808>

- [10] 同向前. 基于负荷功率的三相不平衡度的计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(2): 7.
- [11] Forrest, J.A.C. and Allard, B. (2004) Thermal Problems Caused by Harmonic Frequency Leakage Fluxes in Three-Phase, Three-Winding Converter Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **19**, 208-213. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2003.820223>
- [12] He, Y.J., Zou, Y.P. and Huang, Z. (2007) An Improved Algorithm for Harmonic Current Detection Based on Instantaneous Reactive Power Theory. *Power System Technology*, **31**, 79-83.
- [13] 豆孝华. 饱和电抗器设计与运行特性仿真[J]. 变压器, 2014, 11(11): 4.
- [14] 刘文华. 基于 STATCOM 三相不平衡负载的平衡补偿[J]. 电力电子技术, 2003, 37(4): 3.
- [15] 牟宪民. 串联型可控饱和电抗器谐波特性分析[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(3): 4.
- [16] 罗承廉. 基于链式 STATCOM 的三相不平衡负载的平衡化补偿[J]. 继电器, 2003, 31(10): 5-8.
- [17] 丁留宝. 基于 DSP 的 STATCOM 的研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [18] 李兰芳. 点焊机三相不平衡负荷的静止无功补偿[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 810-815.
- [19] 易爱华. 大容量 STATCOM 的仿真研究及其基于 DSP 的实现[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2007.
- [20] 王明. 三相不平衡系统动态无功补偿控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 73.
- [21] 魏秀明. 电能质量的三相不平衡问题的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2012: 91.
- [22] Hsu, S.-M. and Czarnecki, L.S. (2003) Adaptive Harmonic Blocking Compensator. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **18**, 895-902. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2003.813808>
- [23] Dehnavi, G.R., Shayanfar, H.A., Mahdavi, J. and Saran, M.M. (2001) Some New Aspect of Design and Implementation of TCR for Load Balancing and Power Factor Correction in Distribution Systems. *IEEE Porto Power Tech Conference*, **1**, 109-114.
- [24] 朱丹. 面向三相不平衡负荷的新型补偿装置的研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽理工大学, 2012: 79.
- [25] 赵兴龙. 面向不平衡负荷的静止无功补偿器研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2010: 84.
- [26] Picher, P., Bolduc, L., Dutil, A. and Pham, V.Q. (1997) Study of the Acceptable DC Current Limit in Core-Form Power Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **12**, 257-265. <http://dx.doi.org/10.1109/61.568248>
- [27] 杨安民. 柔性交流输电 FACTS 技术综述[J]. 华东电力, 2006, 34(2): 74-76.
- [28] Zhu, Y.Y., Jiang, W.P., Zeng, Z.H. and Yin, Y.-H. (2005) Studying on Measures of Restraining DC Current through Transformer Neutrals. *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific*, **5**, 1-7.
- [29] 林海雪. 电力系统的三相不平衡[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 1-5.
- [30] Peng, F.Z., Ott, G.W. and Adams, D.J. (1998) Harmonic and Reactive Power Compensation Based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Four-Wire System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **13**, 1174-1181. <http://dx.doi.org/10.1109/63.728344>
- [31] 王晓红. 基于功率平衡理论的三相负载不平衡补偿器的研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2007: 75.
- [32] 李心广, 赖声礼, 秦华标, 徐向民. 电网的无功及三相不平衡综合补偿研究[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 30-33.
- [33] Mathur, R.M. (1984) Static Compensators for Reactive Power Controller. Canadian Electrical Association, Context Publications, Winnipeg, 432-440.
- [34] 贾冬, 翟莎. 平衡不对称负荷的静止无功补偿器的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2008.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>