

混合变压器式可控电抗器及其仿真

丁洪发, 朱庆春

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为满足谐波要求, 传统的变压器式可调电抗器 (Controllable Shunt Reactor of Transformer Type, CSRT) 在轻载时存在一段不可调的死区。针对这一缺点, 提出了混合变压器式可控电抗器 (Hybrid CSRT, HCSRT), 它采用电压源型逆变器代替了 CSRT 中的反并联晶闸管来控制调节绕组的输出, 通过合理设置各控制绕组的容量, N 个控制绕组的 HCSRT 可以实现 2^N 级级平滑调节。在此基础上, 进一步提出了同时具有容性和感性无功补偿能力的混合变压器式静止无功补偿器。理论分析和数字仿真表明 HCSRT 和混合变压器式静止无功补偿器具有响应速度快、调节范围广、谐波污染小及性价比好等优点。

关键词: 混合可控电抗器; 变压器式; 无功补偿; 电压源型逆变器; 混合无功补偿器

中图分类号: TM47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)10-0025-06

0 引言

电力系统的安全、稳定及经济运行水平同无功功率平衡密切相关。为此, 必需装设相应的补偿装置以解决电力系统在不同运行方式下可能出现的无功不足和无功过剩问题。并联电抗器是无功补偿中常用的设备, 但传统的并联电抗器具有响应速度慢、连续可控性差的缺点, 故不能很好地满足动态无功补偿的需要。晶闸管控制电抗器 (Thyristor - Controlled reactor, TCR) 的提出, 较好地解决了上述问题, 但 TCR 工作过程中将产生大量的谐波电流注入系统, 为消除这些谐波需增加大量的滤波器, 从而增加了装置的占地面积和造价^[1-3]。变压器式可控电抗器 CSRT 正是针对这一缺点提出的。和 TCR 相比, CSRT 具有谐波电流较小、功率损耗较低等优点。但 CSRT 存在如下缺点: 轻载时为了减小注入系统电流的谐波畸变率, 存在不可调的死区; 为满足工作区内电抗器输出电流的谐波限制, 控制绕组的各级容量和调节级数必需满足一定的关系, 从而使装置的设计和实现变得复杂^[4]。先进静止无功发生器 (Advanced Static Var Generator, ASVG) 的出现, 为电力系统动态无功补偿提供了新的思路 and 手段^[5,6]。与基于可控电抗器的无功补偿设备相比, ASVG 具有调节速度更快、调节范围更广、谐波输出更小及欠压条件下的无功调节能力更强等优点^[7,8]。但限于电力电子器件的生产和发展水平, 目前制造大容量的 ASVG 仍存在技术难度大、造价

高等问题。

鉴于上述问题, 本文提出了一种混合变压器式可控并联电抗器 HCSRT, 它综合利用了 CSRT 和 ASVG 的技术特点, 具有动态响应速度快、谐波污染小、性价比高等优点。文中详细讨论了 HCSRT 结构和工作原理, 给出了 HCSRT 应用于系统无功动态补偿时的电路结构及其控制系统, 并在此基础上提出了混合变压器式静止无功补偿器。最后, 通过数字仿真方法对工作原理和控制系统的有效性进行了验证。

1 HCSRT 的结构和工作原理

1.1 CSRT 的结构和工作原理

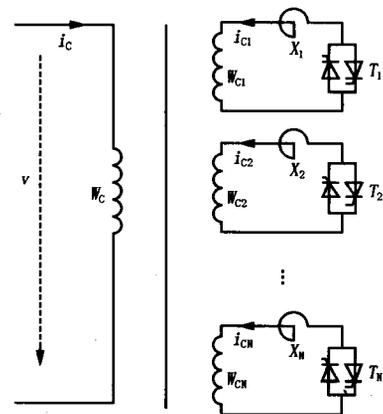


图 1 CSRT 的结构和工作原理图

Fig 1 Diagram of the CSRT structure and working principle

CSRT 相当于具有高短路阻抗的多绕组变压器, 图 1 给出了单相 CSRT 的工作原理图。其中, W_c

基金项目: 中国博士后科学基金资助 (2003034066)

为一次绕组 (或称工作绕组), 直接与外部系统电压 v 连接, i_c 为流过 CSRT 工作绕组的电流 (称为 CSRT 的输出电流); $W_{C1}, W_{C2}, \dots, W_{CN}$ 为二次绕组 (或称控制绕组), T_1, T_2, \dots, T_N 和 X_1, X_2, \dots, X_N 分别为串联在控制绕组中的反并联晶闸管和限流电抗器, $i_{c1}, i_{c2}, \dots, i_{cN}$ 分别为流过各控制绕组的电流。CSRT 通过控制各控制绕组反并联晶闸管的导通和关断以达到分级平滑调节整个电抗器等效阻抗的目的。对应每一个稳定工作状态, CSRT 只有一个绕组处于调节状态 (即晶闸管仅在一个周期内的部分时段导通, 相当于工作在 TCR 模式), 而其它绕组则处于短路或开路状态 (即晶闸管在一个周期内全导通或全阻断)。通常, 可以认为处于全导通或全关断的绕组不会对系统产生谐波污染。由于处于调节状态的控制绕组容量只是电抗器总容量的一部分, 所以, 尽管该绕组的电流中可能存在严重的谐波畸变, 但从电抗器的一次侧来看, 电流谐波与总工作电流相比就可能相对比较小了。如果 CSRT 的所有控制绕组均可以工作于调节状态, 则对应给定的等效输出电抗, 电抗器的调节绕组及相应全导通 (或全关断) 绕组可以有多种组合方式, 但不同组合方式下电抗器输出电流的谐波含量是不同的。通常, CSRT 输出电流的谐波含量和以下因素有关: 处于全导通状态的控制绕组的个数及容量; 处于调节状态绕组容量占电抗器总容量的比例; 处于调节状态绕组的晶闸管触发角。通过验证发现, 对于同一 CSRT 的同一等效输出阻抗, 处于调节状态绕组容量占电抗器总容量的比例越小, CSRT 输出电流的谐波含量就越低。因此, 在满足分级平滑调节的前提下, 通常希望处于调节状态控制绕组的容量越小越好。此外, 为了简化控制系统, 通常设定只有一个控制绕组可以工作于调节状态。在后面的讨论中, 如果没有特别说明, 控制绕组 1 (W_{C1}) 默认为可以工作于调节状态的绕组, 并称它为调节绕组。

图 2 给出了当处于调节状态绕组的晶闸管触发角由 0 到 90 变化时, CSRT 输出电流的总谐波畸变度 (THD) 曲线图。其中: CSRT 具有 4 个控制绕组, 各控制绕组容量分别为 Q_1, Q_2, Q_3 和 Q_4 , 其比值为 1:1:2:4。假定只有控制绕组 1 可以工作在调节状态, 而其它绕组只能工作在全导通或全阻断状态, 这样通过 4 个控制绕组, CSRT 可以实现 8 级平滑调节。图 2 中, 曲线上的数字“1”表示只有控制绕组 1 工作于调节状态, 其它绕组全阻断; “1&2”表示绕组 1 工作于调节状态, 绕组 2 全导通; “1&2&3”表示绕

组 1 工作于调节状态, 绕组 2、3 全导通, 以此类推。由图 2 可见, 整体而言, CSRT 输出电流的谐波畸变有了较大的改善, 尤其在 CSRT 等效容量较大时。但从图 2 中的曲线 1、1&2 和 1&3 可见, 当 CSRT 轻载, 尤其是当调节绕组的晶闸管触发角处于 30 附近区域时, 其输出电流仍存在较大的谐波畸变。因此, 在实际应用时, 应采用适当的控制方式使 CSRT 避免工作于这些区段。换句话说, 为了满足谐波要求, CSRT 在轻载时存在一段不可调的死区。

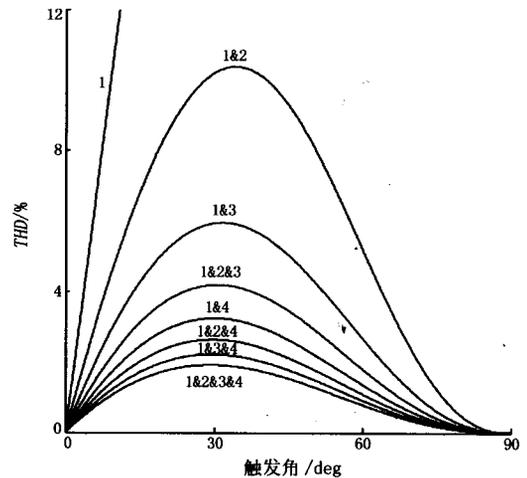


图 2 CSRT 输出电流的总谐波畸变度曲线图
Fig 2 Curves of the total harmonic distortion (THD) of CSRT output current

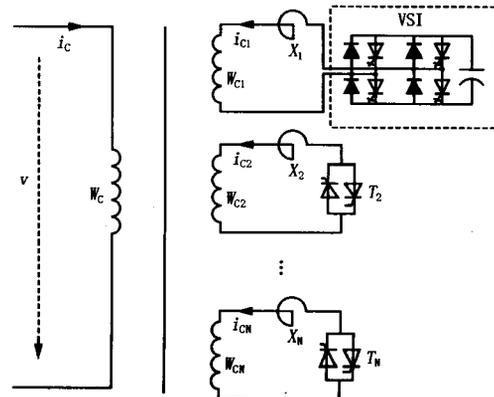


图 3 HCSRT 的结构和工作原理图
Fig 3 Diagram of the HCSRT structure and working principle

1.2 HCSRT 的结构和工作原理

图 3 给出了 HCSRT 的结构和工作原理图。比较图 3 和图 1 可见, 两者的主要区别在于调节绕组的控制方式。其中, CSRT 中的调节绕组是通过反并联晶闸管控制的, 即工作于 TCR 模式, 因此, 它只

能在感性区域工作,且输出电流的谐波畸变大;而 HCSR T中的调节绕组是通过电压源型逆变器(Voltage Source Inverter, VSI)控制的,即工作于 ASVG方式,因此,它既可以工作于感性区域,又可以工作于容性区域,且输出电流的谐波畸变小。HCSR T各控制绕组的容量可以根据实际需要设定为按一定的几何级数增长,本文设定为按 2 的几何级数增长,这样, N 个控制绕组可以实现 2^N 级分级平滑调节。和 CSR T相比, HCSR T具有如下优点: 具有更快的响应速度; 通过适当的控制, HCSR T的调节绕组可以输出容性或感性电流,因此 HCSR T具有更广的调节范围; 对于同容量、同绕组个数的分级连续可调电抗器, HCSR T可以实现更多的调节级数,所需调节绕组容量小。以具有 4 个绕组的同容量可调电抗器为例,假设只有容量最小的控制绕组可以工作于调节状态。如前所述,为实现分级连续平滑可调, CSR T各控制绕组的容量比值为 1 1 2 4,调节级数为 8,调节绕组的容量为总容量的 1/8,而 HCSR T各控制绕组的容量比值可以取为 1 2 4 8,调节级数为 16,调节绕组的容量(近似为 VSI 的容量)为总容量的 1/15。由于 VSI 的容量和总容量的比值较小,因此和 ASVG 相比, HCSR T比较容易实现大容量; 由于 VS 输出电流谐波畸变大大小于晶闸管控制电抗器(TCR),以及调节绕组的容量相对较小,因此, HCSR T具有更好的谐波性能; 通过适当的控制, HCSR T的调节绕组还可以工作于有源滤波器(Active Power Filter)方式,补偿无功的同时补偿负荷产生的谐波电流,用于诸如钢铁厂、电气化铁道等负荷的无功和谐波补偿。

表 1 典型运行工况下 CSR T和 HCSR T输出电流的 THD

Tab 1 THDs of the CSR T and HCSR T output currents under the typical operation conditions (%)

输出电流 /p. u	0.06	0.1	0.3	0.7	0.9
CSR T1	51.885	35.524	9.584	2.861	3.555
CSR T2	29.327	10.017	5.921	2.285	1.597
HCSR T	0.359	0.421	0.156	0.331	0.400

表 1 给出了分别具有 4 个控制绕组的 CSR T和 HCSR T在几种典型运行工况下的输出电流总谐波畸变度(%)。其中各控制绕组容量比为: 1 1 1 1 (CSR T1), 1 1 2 4 (CSR T2), 1 2 4 8 (HCSR T), HCSR T的调节绕组采用电流滞环控制方式。为了简单起见,在本文的计算中做了如下假设: 变压器为线性变压器; 各控制绕组之间的互感可以

忽略不计。由表 1 可见, HCSR T的谐波性能大大优于 CSR T,尤其是在电抗器轻载情况下。

2 HCSR T在无功补偿中的应用

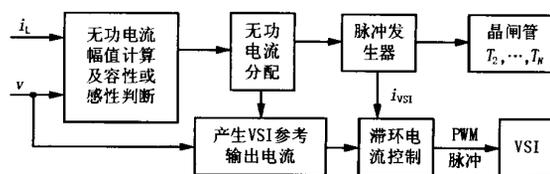


图 4 FC + HCSR T无功补偿系统的控制框图

Fig 4 Controlling of the FC + HCSR T reactive power compensation system

由于 HCSR T的大部分工作区域属于感性,因此在实际应用时,可以根据需要,和一定容量的固定电容器(FC)一起组成并联无功补偿装置,以补偿系统的感性和容性无功。由于 HCSR T输出电流的谐波畸变非常小,在实际应用时,不需考虑滤波器的设计,因此,由 FC + HCSR T组成无功补偿系统的整体性能远远优于传统的 FC + TCR 无功补偿系统。

图 4 给出了 FC + HCSR T无功补偿系统的控制框图。其中,无功电流计算及容性或感性判断模块根据负荷电流和系统供电电压计算出负荷电流中无功分量的幅值,并对该无功分量的属性(容性或感性)进行识别;无功电流分配环节根据无功电流的幅值和属性将其分配到各个控制绕组中去,从而决定控制绕组中各反并联晶闸管的导通或关断,并给出调节绕组输出参考电流的幅值和属性(该参考电流的属性可能和负荷无功电流相同,也可能不同); VSI 参考输出电流产生模块则是根据计算所得的参考电流幅值和属性以及系统供电电压产生 VS 输出电流的参考量,该量和 VS 输出电流的实际值一起作为滞环电流控制模块的输入,用于产生 VSI 工作的 PWM 脉冲信号;脉冲发生器用来产生晶闸管的触发脉冲,为了减小电抗器投入时可能产生的直流电流分量,晶闸管选在其两端电压到达最大值的时刻投入,所以在晶闸管脉冲发生模块中加入了晶闸管电压的测量(或计算)和最大值判断模块。

和 FC + TCR 补偿系统一样,由 FC + HCSR T组成无功补偿系统也存在设备损耗大的缺点,而且,即使补偿器工作在吸收较小的无功电流时,设备的损耗也比较大,这时由于此时电抗器和电容器都已吸收了很大的无功电流,只是相互抵消而已。如果将 FC 按一定的容量比列关系分成几个不同部分,分别和反并联晶闸管串联后并接入图 3 所示的控制绕

组 W_{C2}, \dots, W_{Cn} 中,则可以大大降低无功补偿系统的损耗,我们称该系统为混合变压器式静止无功补偿器(简称混合无功补偿器)。图 5 为具有 4 个控制绕组的混合无功补偿器结构和工作原理图,其中,绕组 1 为调节绕组。和图 3 不同的是,图 5 中控制绕组 2、3 和 4 分别多了一条由晶闸管和电容器串联而成的支路(简称电容支路),其中,电容器 C_2, C_3 和 C_4 的容量分别为 Q_{C2}, Q_{C3} 和 Q_{C4} ,其比值为 1 2 4,其大小根据实际系统的补偿要求而定;每条电容支路都串联了一个阻尼电抗器,以降低电容器投入或故障时电路的冲击电流。通过控制调节绕组输出以及反并联晶闸管 $T_{21}, T_{22}, T_{31}, T_{32}, T_{41}$ 和 T_{42} 导通和关断状态,就可以控制混合无功补偿器的输出无功电流,实现系统无功补偿的目的。

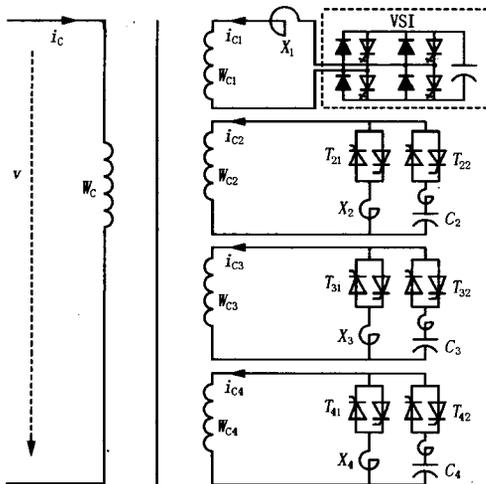


图 5 混合变压器式静止无功补偿器的结构和工作原理图

Fig 5 Configuration and working principle of the static var compensator of the hybrid transformer type

混合变压器式静止无功补偿器的控制系统和 FC + HCSRT 类似,即由无功电流计算及容性或感性判断模块、无功电流分配环节、VSI 参考输出电流产生模块、滞环电流控制模块以及晶闸管脉冲发生模块组成。值得一提的是为减小电容器投入时可能产生的冲击电流及振荡,必需合理选择电容器的投入时间。研究表明,最佳的投入时间是晶闸管两端电压为零的时刻,也就是电容器两端电压等于电源电压的时刻。所以在晶闸管脉冲发生模块中必需加入电容支路晶闸管电压的测量(或计算)和过零判断模块。

3 仿真分析

利用 Matlab/Simulink 对图 6 所示的简单电路

进行仿真,以验证补偿器及其控制系统的有效性。图 6 中, e 为系统电源, Z_T 为系统和线路的等效阻抗, v_L 为负荷电压, i_s, i_L 和 i_T 分别为系统电流、负荷电流和补偿器输出电流。负荷为线性,其无功功率在 $-Q$ (容性) $\sim +Q$ (感性) 之间变化。补偿器分别采用 FC + HCSRT 和图 5 所示的混合变压器式静止无功补偿器,其中, HCSRT 和混合补偿器各具有 4 个控制绕组。为实现负荷无功的全补偿,补偿器的各部分容量分别设置为: FC 为 $-\frac{7}{8}Q$, HCSRT 控制绕组 1 ~ 4 的容量分别依次为 $\pm\frac{1}{8}Q, \frac{1}{4}Q, \frac{1}{2}Q$ 和 Q ; 混合无功补偿器控制绕组 1 的容量为 $\pm\frac{1}{15}Q$, 控制绕组 2 ~ 4 电抗器的容量分别依次为 $\frac{2}{15}Q, \frac{4}{15}Q$ 和 $\frac{8}{15}Q$, 控制绕组 2 ~ 4 电容器的容量分别依次为 $-\frac{2}{15}Q, -\frac{4}{15}Q$ 和 $-\frac{8}{15}Q$ 。由上述补偿器的容量设置可见,对于同样的无功负荷, FC + HCSRT 的(电抗器)容量远比混合补偿器大。

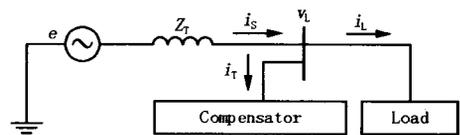


图 6 仿真电路

Fig 6 Simulation circuit

图 7 给出了当负荷无功 Q_L 由 $-Q$ ($= 0.707$ pu) 变到 0, 再变到 $+Q$ 时利用 FC + HCSRT 补偿后的仿真结果,其中两次负荷无功变化时刻分别为 $t = 0.1$ s 和 $t = 0.18$ s。补偿器开始稳定运行于补偿容性无功 $-Q$ 的状态,当负荷无功变化时,补偿器的输出也随之改变以跟踪补偿负荷的无功。由图 7 可见,补偿器的整体响应时间为半个周波,稳定补偿后的系统电流 i_s 与负荷电压 v_L 同相,即实现了无功的全补偿。当负荷开始变化后的半个周波里,图 7 中的负荷电压幅值有微小的降落,这是由于补偿器动态响应过程中存在的感性无功过补偿电流在线路上产生了压降引起的;同样,如果负荷无功向感性减小方向或向容性增大方向变化时,补偿器的动态响应过程中也存在容性无功过补偿问题,从而使动态过程中的负荷电压幅值有微小的升高。

从图 7 中还可以看出,尽管当负荷的无功为 0 时补偿器的总体输出无功电流 i_T 为 0,但此时固定

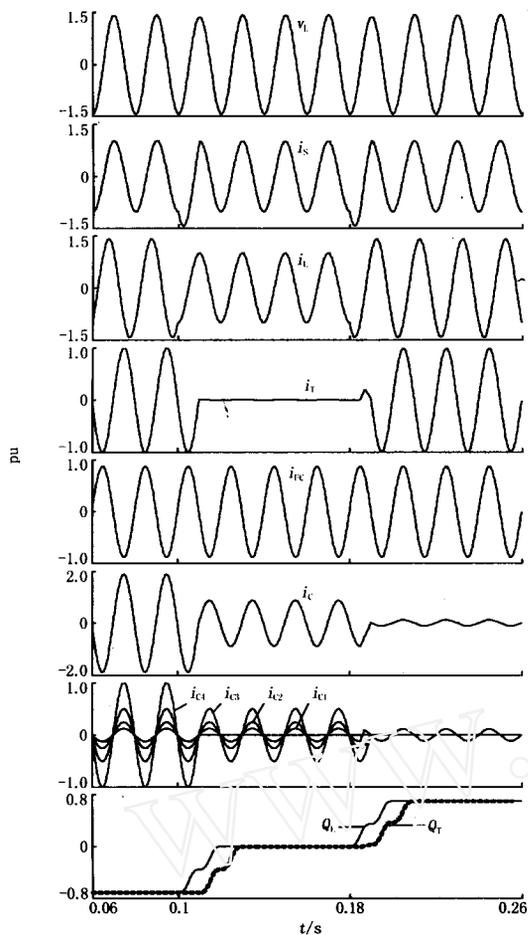


图 7 利用 FC + HCSRT 进行无功补偿的仿真波形

Fig 7 Simulation waveforms of the reactive power compensation by using FC + HCSRT

并联电容器的输出电流 i_{FC} 和 HCSRT 的输出电流 i_C 都不等于 0, 只是互相抵消而已。此外, 为了补偿容性无功 $-Q$, HCSRT 的输出电流幅值接近于负荷无功电流的两倍。FC + HCSRT 这些特点将使装置的损耗增加、设计容量增大, 从而降低设备的经济性。

图 8 给出了利用混合无功补偿器进行补偿后的仿真结果, 其中负荷的变化情况和图 7 相同。由图 8 可见, 当负荷由 $-Q$ 向 0 变化时, 补偿器的整体响应时间为半个周波, 而负荷由 0 向 $+Q$ 变化时, 补偿器的整体响应时间为 $1/4$ 个周波。值得一提的是, 在实际系统中这种混合无功补偿器的动态响应时间与负荷的变化时刻、负荷无功 (或补偿器输出无功) 变化方向以及电容支路上电容器的残压有关。当补偿器的输出无功由感性向容性变化或容性无功向增大方向变化时, 补偿器的最大动态响应时间为一个周波; 而当补偿器的输出无功由容性向感性变化或感性无功向增大方向变化时, 补偿器的最大动态响应时间为半个周波。和 FC + HCSRT 类似, 混合无

功补偿器也存在动态响应过程中的感性或容性无功过补偿问题。

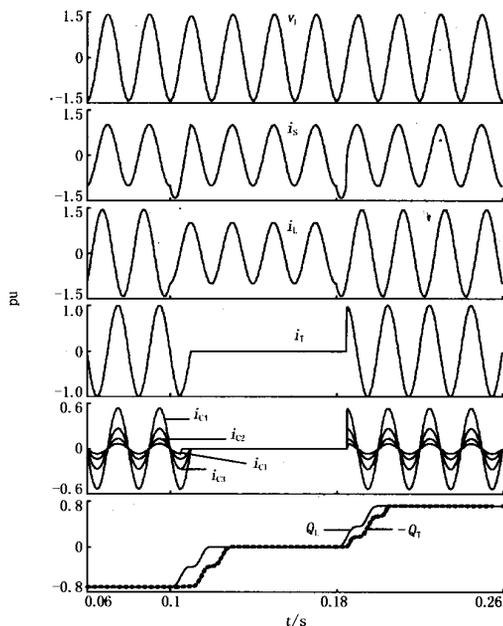


图 8 利用混合无功补偿器进行无功补偿的仿真波形

Fig 8 Simulation waveforms of the reactive power compensation by using the hybrid reactive power compensator

和图 7 不同, 在图 8 中, 当负荷的无功为 0 时补偿器的总体输出无功电流 i_T 以及各控制绕组的输出电流都为 0。此外, 同样补偿容性无功 $-Q$, 混合无功补偿器输出电流幅值远小于 FC + HCSRT 补偿器中 HCSRT 的输出电流幅值, 仅和负荷无功电流幅值相等。因此, 对于同样的负荷, 混合无功补偿器的设计容量、装置运行损耗均小于 FC + HCSRT 补偿器, 设备的经济性能较高。

由于 HCSRT 和混合无功补偿器中的电压源逆变器 VS 容量相对较小, 所以其产生的谐波电流在整个补偿器输出电流中所占的比例很小; 此外, VS1 的损耗在整个装置中所占的比例也较小, 所以可以采用较高开关频率以进一步减小其输出电流中的谐波。从图 7 和图 8 可见, VS1 输出电流以及补偿器的总体输出电流的谐波畸变都非常小, 说明两种装置均具有良好的谐波性能。

4 结论

变压器式可调电抗器 CSRT 输出电流的谐波含量和处于全导通状态的控制绕组数量、处于调节状

态绕组容量占电抗器总容量的比例及其晶闸管触发角有关,为满足谐波要求,传统的变压器式可调电抗器在轻载时存在一段不可调的死区。

本文提出的混合变压器式可控电抗器 HCSRT 采用电压源型逆变器代替了 CSRT 中的反并联晶闸管来控制调节绕组的输出,通过合理设置各控制绕组的容量, N 个控制绕组的 HCSRT 可以实现 2^N 级分级平滑调节,且其工作区域不受负载条件限制。具有动态响应速度快、谐波污染小、性价比高等优点。

HCSRT 可以和固定并联电容器一起组成系统无功动态补偿器,也可以在各控制绕组分别并联接入和反并联晶闸管串联、容量呈一定比例的电容器,组成性能更好的混合变压器式静止无功补偿器。数字仿真表明 HCSRT 及其派生的无功补偿器能很好地解决系统无功动态补偿问题,且对系统无谐波污染,具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] CHEN Jen-hung, LEE Wei-jen, CHEN Mo-shing Using a Static Var Compensator to Balance a Distribution System [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1999, 35 (2): 298-304.
- [2] Mayordomo J G, Izzeddine M, Asensi R. Load and Voltage Balancing in Harmonic Power Flows by Means of Static Var Compensators [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17 (3): 761-769.
- [3] Mutluer B, Cadirci I, Emis M, et al A Unified Releactable SVC for Open-cast Lignite Mining in Turkey [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2004, 40 (2): 650-663.
- [4] 田铭兴, 励庆孚. 变压器式可控电抗器的谐波分析和功率级数计算 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (8): 168-171.
TIAN Ming-xing, LI Qing-fu Harmonic Current and Power-step Number of Controllable Shunting Reactors of Transformer Type [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (8): 168-171.
- [5] Hanson D J, Woodhouse M L, Howill C, et al STATCOM: a New Era of Reactive Compensation [J]. Power Engineering Journal, 2002, 16 (3): 151-160.
- [6] Schauder C, Gemhardt M, Stacey E, et al Operation of ± 100 MVar TVA Station [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12 (4): 1805-1811.
- [7] Tan Y L. Analysis of Line Compensation by Shunt-connected FACTS Controllers: a Comparison between SVC and STATCOM [J]. IEEE Power Engineering Review, 1999, 19 (8): 57-58.
- [8] Garcia-Cerrada A, Garcia-Gonzalez P, Collantes R, et al Comparison of Thyristor-controlled Reactors and Voltage-source Inverters for Compensation of Flicker Caused by Arc Furnaces [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15 (4): 1225-1231.

收稿日期: 2004-09-07

作者简介:

丁洪发 (1973 -), 男, 博士后, 主要从事电能质量和 FACTS 技术的研究; E-mail: dinghf@vip.sina.com

朱庆春 (1981 -), 男, 硕士研究生, 电力电子技术在电力系统中的应用。

Controllable shunt reactors of hybrid transformer type and its simulations

DING Hong-fa, ZHU Qing-chun

(School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: on satisfying the harmonic requirement, conventional controllable shunt reactor of transformer type (CSRT) has a dead zone under light-load condition. To solve this practical problem, a hybrid CSRT (HCSRT) is presented, which employs the voltage source inverter (VSI) to replace the bi-directional thyristor valve to control the output current of the regulating winding. After introducing duplicate winding ratings and proportioned 1: 2: 4: ...: 2^{N-1} , the reactance of HCSRT can be continuously and smoothly regulated in the total of 2^N steps with N control windings. A static var compensator of hybrid transformer type, which has both capacitive and inductive reactive power, is also presented in this paper. The theoretical analysis and digital simulations demonstrate that the HCSRT and static var compensator of hybrid transformer type have many advantages, such as fast response, wide regulating area, little harmonic pollution and good cost-performance ratio.

This project is supported by China Postdoctoral Science Foundation (No. 2003034066).

Key words: hybrid controllable shunt reactor; transformer type; reactive power compensation; voltage source converter; hybrid reactive power compensator