

文章编号:1001-1609(2001)03-0039-04

HT-7U 高功率电源系统中 SVC 的控制

陶 骏, 刘正之

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

CONTROLLING OF SVC IN HT-7U HIGH POWER SUPPLY SYSTEM

TAO Jun, LIU Zhengzhi

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

摘要: 本文通过对 HT-7U 高功率电源系统中 SVC 装置 (SC+TCR) 控制方式的研究, 提出了一种补偿精度高、响应快的控制方法。通过检测系统的无功功率并采用电网电压反馈的 PI 控制和动态比例因子的模糊控制相结合的方法, 大大提高了控制性能。同时解决了投切电容器的振荡现象, 仿真结果也验证了控制方法的正确性。

关键词: 动态无功静止补偿装置; 无功检测;

投切逻辑; 电压反馈; 模糊控制

中图分类号: IM 131.4 **文献标识码:** B

Abstract: In this paper, a new control method of SVC (SC+TCR) is proposed with high precision of compensation and fast response time. Through the combination of PI control with the feedback of electric supply voltage and the fuzzy control with dynamic proportion factor, the control performance is improved greatly according to the detected reactive power. Also, the surge current of switching-on/off capacitor is avoided. The control method is verified by simulation.

Key words: SVC; detecting of reactive power, logic of switching-on/off; feedback of voltage; fuzzy control

1 引言

动态无功静止补偿装置(SVC)是柔性交流输电系统(FACS)家族的重要一员,它可以对电力系统的无功进行动态补偿,抑制电压的波动,降低网损,补偿不平衡负荷,保证电力系统的安全、经济运行^[1],一般的 SVC 装置由固定补偿电容器或分组投切的电容器(FC/SC)及晶闸管控制的电抗器(TCR)构成,对无功变化范围较大的动态负荷,采用 SC+TCR 的方案,可提高补偿精度,降低 TCR 的安装容量。为了保证较好的补偿效果,对于这类装置的电

容器组投切及 TCR 中晶闸管触发角的控制是关键,本文提出了一种新的 SVC 控制方法,通过检测负载的无功,直接确定投切的电容器组别;通过检测电网的无功,引入电网电压的负反馈,并结合模糊 PI 控制器,实现对 TCR 的控制。

HT-7U 是可以实现准稳态运行的大型磁约束超导托卡马克实验装置,其电源系统的容量为 50 MVA,一个放电周期中,无功在 0~30 MVar 之间波动,由于波动范围大,采用 SC+TCR 的 SVC 装置对其进行补偿。

2 SVC(SC+TCR)主电路的设计

SVC 中分组电容器只能有级差的补偿无功,借助 TCR 对无功连续调节的特点,可实现连续的动态补偿。在 HT-7U 的电源系统中,需补偿的最大基波无功为 30 MVar,采用 4 套可投切的电容器组,按容量倍增原则设计安装容量,分别为 2、4、8 MVar 和 16 MVar,这样电容器组可补偿 2、4、6…30 MVar 共 15 种组合的滞后无功,其补偿级差为 2 MVar。按此方法分组可保证在一定的分组数下,获得最多的容量组合,从而使补偿级差控制为最小,并减少 TCR 的安装容量和 TCR 运行时带来的谐波污染。TCR 可输出 0~2 MVar 的无功(超前),从而使 SVC 实现对 0~30 MVar 无功(滞后)的连续补偿。补偿装置的主电路如图 1 所示。

由于被补偿系统中含有大量的谐波,分组投切的电容器兼作滤波用,在各投切的电容器中设置了 5、7、11、13 次单调谐及高通滤波器。

3 电容器组投切的控制

在电容器组投切的控制中,直接根据负载的无

收稿日期:2001-01-16; 修回日期:2001-03-06

基金项目:国家九五大科学工程项目支持

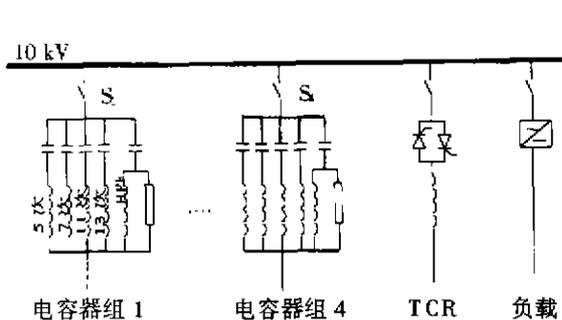


图1 SVC的主电路

功,确定投切的逻辑关系。该方法与常用的检测系统功率因数的方法^[2,3]相比,既可以提高补偿精度,又可避免投切的振荡现象。按功率因数为标准的投切方法,一般在功率因数达到一定的范围后就不再投切电容了,这难以保证补偿的精度。为了提高补偿精度,势必缩小功率因数容许的范围,这将可能造成投切的振荡现象,如投入若干组电容器时功率因数尚未达到容许值,则要求再投入电容器,若再投入时出现了过补偿现象,则又要求切除一组电容器,如此反复引起了投切的振荡。同时在负荷较轻时,投切振荡亦可能出现,如系统需补偿的无功小于最小一组的安装容量,按功率因数的要求需投入一组电容器,但其投入后又造成了系统的过补偿,同样引起了投切的振荡。根据负荷的无功,直接确定投切的电容器组别,不会产生振荡现象,并保证了较高的补偿精度。

3.1 无功的测量

无功快速、准确的检测是无功动态补偿的关键。HT-7U电源系统是一含有大量谐波的非正弦系统,对这样的系统采用正弦波调制,建立了一种简单、快速的检测方法。忽略三相电源系统中的电压畸变,直接将畸变的电流中的基波无功分量分离。

设三相电压为:

$$\begin{cases} u_a = U \cos \omega t \\ u_b = U \cos(\omega t - 120^\circ) \\ u_c = U \cos(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

正弦调制波的相位滞后电压 90° ,为:

$$\begin{cases} m_a = \sin \omega t \\ m_b = \sin(\omega t - 120^\circ) \\ m_c = \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

实际中调制信号可由电网电压通过移相获得。

畸变的三相负载电流为:

$$\begin{cases} i_a = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega t - \varphi_n) \\ i_b = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos[n(\omega t - 120^\circ) - \varphi_n] \\ i_c = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos[n(\omega t + 120^\circ) - \varphi_n] \end{cases} \quad (3)$$

调制的作用是将各相电流的瞬时值与调制信号的瞬时值相乘,再三相叠加。对畸变电流的调制从频谱分布上看,相当于将畸变电流的频谱在频率轴上向左、向右各移动 50 Hz ,这样,基波电流就对应于直流分量。由于调制信号滞后电压 90° ,得到的基波电流实质是无功分量。

根据上述调制方法,得到的调制结果为:

$$A = \sum_{k=a,b,c} m_k i_k = \frac{3}{2} I_1 \sin \varphi_1 + f(\omega) \quad (4)$$

式中, I_1 为基波电流幅值, φ_1 为功率因数角, $f(\omega)$ 为交变分量,第一项的直流量反映了基波无功电流的幅值,通过一低通滤波器可方便地将基波无功电流从调制结果中分离,图2给出了这种检测方法的框图。

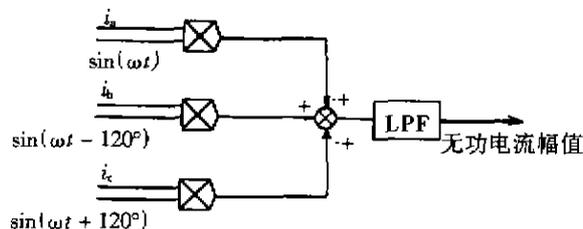


图2 无功电流检测框图

3.2 电容器组投切控制

传统的电容器组投切,根据功率因数,采用了分步循环投切的方法。当负荷的无功变化较大时,可能会出现不必要的投切操作,影响开关及电容器的寿命,同时也有可能给电网带来冲击电流。

根据负载无功电流的实时检测量,将负载的无功电流与一系列给定值比较,可获得电容器组的投切逻辑,这些给定值分别对应于产生 $2, 4, 6 \text{ MVar} \dots 30 \text{ MVar}$ 容性无功时的电流。

在这种控制方法中,如果系统无功变化得非常迅速,会导致投切开关的操作频率过高,这是不利的,往往也是不必要的。对投切控制方法进行改进,在无功变化较慢期间,按无功量实时检测结果控制电容器组的投切。在无功变化迅速期间,允许电网出现一定量的过补偿或欠补偿,此时,根据无功变化率的大小将部分投切开关维持原有的状态。

按照上述方法对控制系统进行改进,不仅需要

检测系统的无功量,还需检测系统的无功变化率 dQ/dt 。考虑投切开关的延时为 20 ms,维持各电容器组的开关原有状态的无功变化率为:

$$\left. \frac{dQ^*}{dt} \right|_1 = \frac{2}{0.02} = 100 \text{ MVar/s}$$

$$\left. \frac{dQ^*}{dt} \right|_2 = \frac{2+4}{0.02} = 300 \text{ MVar/s}$$

$$\left. \frac{dQ^*}{dt} \right|_3 = \frac{2+4+8}{0.02} = 700 \text{ MVar/s}$$

$$\left. \frac{dQ^*}{dt} \right|_4 = \frac{2+4+8+16}{0.02} = 1500 \text{ MVar/s}$$

投切控制的流程如图 3 所示, S_1 到 S_4 分别对应于 2 MVar 到 16 MVar 补偿器的开关信号。

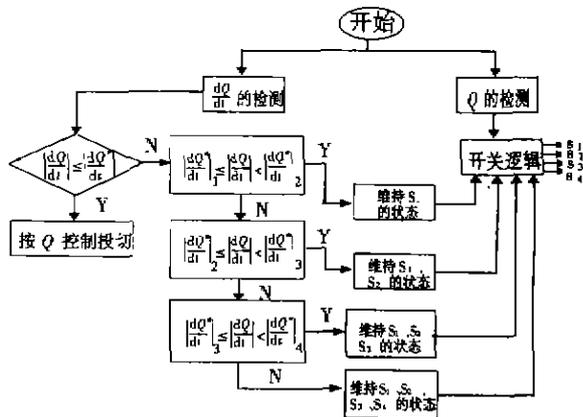


图 3 投切控制流程

4 TCR 的控制

TCR 的功能是保证 SVC 装置对无功实现连续补偿,分组投切的电容器组使系统出现少许的过补偿,此时 TCR 工作,以抵消过剩的无功。TCR 的输出方程: $I_p = \sqrt{3} \frac{\delta - \sin \delta}{\pi X_L} U$ 。

一般 TCR 联结成三角形,上式中 I_p 为 TCR 注入电网的基波电流(线电流), δ 为晶闸管的导通角, X_L 为 TCR 的基波电抗, U 为电网的线电压。如前述方法,可检测出电网的无功电流,由此得到导通角 δ ,从而使 TCR 向电网注入的电流恰好抵消电网中的超前的无功电流。由导通角可确定 TCR 中晶闸管的触发角 $\alpha = \pi - \frac{\delta}{2}$,则晶闸管触发移相范围为 $90^\circ \sim 180^\circ$, 0° 触发角对应于线电压过零处。

这种开环控制方法具有系统结构简单的优点,但其补偿精度难以保证。一方面在检测算法中,有滞后环节——低通滤波器,大大降低了响应速度,当

系统无功发生变化时,检测系统难以很快反映这种变化,由此引起了补偿的误差;另一方面,补偿效果过分依赖于检测的精度,如电网电压的波动会给无功电流的检测带来误差。为了提高控制精度,在开环控制的基础上,引入了电压闭环控制,既增加系统精度,又提高了响应速度和电压稳定。

由电力系统分析可知,电网中的无功近似正比于电压波动值,即 $\Delta U \propto Q$ 。这样,根据电网电压的偏差,可获得需补偿的无功,并以此修正无功电流检测的误差和检测的时延。TCR 控制框图如图 4。上述的电压调节器一般设计成 PI 控制器。

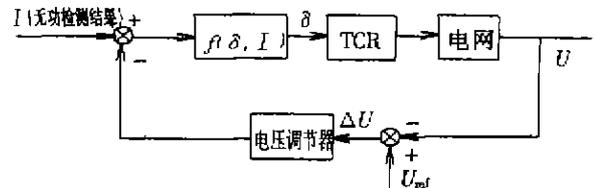


图 4 TCR 控制系统框图

由于 TCR 中晶闸管的触发角与控制量(如系统的无功电流)之间是非线性关系,单纯采用 PI 控制,效果往往仍不近人意。模糊控制在解决非线性系统的控制中取得了很好的效果,在 TCR 控制中,引入模糊控制,将其与普通 PI 控制复合,可进一步改善控制效果。

在这里采用了二维模糊控制器,输入误差及误差变化率的模糊值,控制器通过模糊运算得到控制量的模糊值,将其解模糊化后得到 TCR 的控制量,从而对原有的 PI 控制进行补充与修正。系统的模糊 PI 控制框图如图 5 所示。

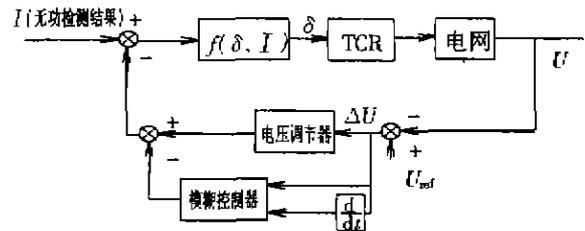


图 5 TCR 模糊 PI 控制框图

一般的模糊控制器中,反映控制量的模糊集论域到基本论域(精确值的集合)映射的比例因子 K 是固定的, K 的选择对系统的控制性能影响很大^[4]。本文提出了比例因子动态调整的模糊 PI 控制器,使控制器具有一定的自适应功能,提高了控制性能。当系统的无功较大时,为了加快动态响应,需要给系统较大的控制量,比例因子取得较大;当系统的无功较小时,为了防止出现超调,希望控制量小一点,取

较小的比例因子。上述算法的一种简单的实现方法是由系统的无功电流,通过一比例环节,得到解模糊化的比例因子。这种方法实质是,当系统误差较大时,模糊控制的作用显著,以加快系统的响应速度;系统基本进入稳态时,模糊控制的作用减弱,防止系统出现超调。

5 仿真分析

对 SVC 系统进行仿真^[5],采用电磁暂态仿真程序(EMTP)。负载为驱动纯电感的六脉波晶闸管相控变流器,为了模拟 HT-7U 电源系统的工况,变流器工作在给电感负载充电的暂态过程中,此时负载电流不断增大,电源系统提供的无功也不断增大,图 6 给出了网侧无功的波形(“+”表示滞后无功,“-”表示超前无功),在 0~1 s 中,无功由 0 增至 2 MVar(滞后)。投入电容器后,其网侧无功如图 7 所示,可见,系统出现了过补偿。为了改善功率因数,TCR 需投入。

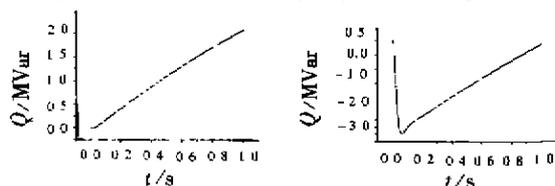


图 6 负载的无功 图 7 投入电容器组后的无功

图 8 为投入 TCR 后(在 0.2 s 投入),电网中的无功波形,此时 TCR 采用了开环控制方式,可见补偿精度很低,系统仍然存在过补偿。

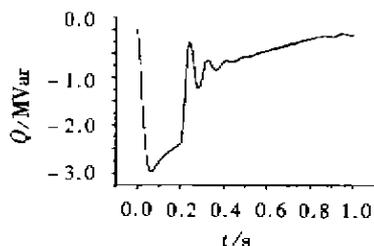


图 8 开环控制的补偿效果

引入电网电压的负反馈,获得了很好的补偿效果,图 9 为引入电压反馈后的电网无功波形,此时无

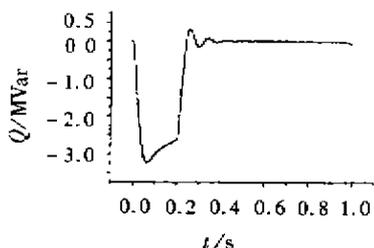


图 9 引入电压闭环控制的补偿效果

功基本被补偿至零,但系统仍出现超调现象,过渡过程时间稍长。

采用模糊 PI 控制,通过模糊控制器得到的控制量,对 PI 控制器产生的控制量进行补充,改善了系统的控制效果。图 10 为仿真的系统无功波形。可见,超调基本被消除,响应速度也提高了。在 TCR 这类装置的控制中引入模糊控制是成功的。

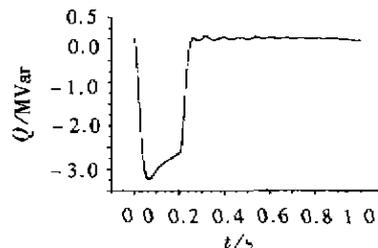


图 10 模糊 PI 控制的补偿效果

6 结论

本文通过对 HT-7U 高功率电源系统中 SVC 控制方式的研究,提出了一种通过检测负载的无功,直接按一定的准则投切电容的方法,既提高了补偿精度,又避免了投切电容的振荡现象。在 TCR 的控制中,提出了按电网无功的开环控制与电网电压反馈控制相结合的方法,保证了补偿精度,提高了响应速度。通过引入比例因子动态调整的模糊 PI 控制能进一步抑制系统超调,加快响应速度,大大提高控制性能,使这种方法更适合用于对动态负荷补偿的 TCR 控制中。同时仿真结果也验证了该方法的正确性。

参考文献:

- [1] 梁志勇. 静止无功补偿设备运行综述[J]. 电力电容器, 1997, No. 2: 41~45.
- [2] 胡志坤, 刘建荣. 输电线路 10kV 柱上自动无功补偿设计[J]. 电力电容器, 1997, No. 1: 11~17.
- [3] 江秀臣, 李锋, 郭效金. 无功补偿新技术. 高压电器[J]. 2000, No. 3: 11~17.
- [4] 陶永化, 尹怡欣, 葛芦生. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [5] Koessler R J. Dynamic Simulation of Static Var Compensators in Distribution Systems [J]. IEEE Trans. on PS. 1992, 7(3): 1285~1291.

作者简介: 陶 骏(1971-), 男, 博士研究生, 主要从事电网的无功补偿及谐波抑制。