

变压器式可控电抗器的控制绕组无功容量分析

刘海涛, 张卫星, 刘 瑜, 杨爱新
(山东大学电气工程学院, 济南 250061)

摘要: 分析比较两种不同绕组控制方式下的电抗器: 晶闸管控制方式(thyristor controllable reactor, TCR)和先进静止无功发生器控制方式(advanced static var generator, ASVG)。针对TCR控制方式在轻载或空载存在死区的问题, 提出将第一级控制绕组采用ASVG控制方式, 以增加可调性并减少谐波含量。将多并联支路型可控电抗器的支撑导通法, 应用到变压器式可控电抗器的绕组功率控制上, 通过第一级ASVG控制绕组和其它TCR控制绕组的相互配合, 实现连续平滑调节。针对无功容量最优分配问题建立了相应的数学模型, 并以此确定出各级绕组最佳的功率容量分配。

关键词: 可控电抗器; 变压器式; 支撑导通法; 电压型逆变器

中图分类号: TM554 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-8930(2006)06-0070-03

Reactive Power Capacitance Analysis for Controllable Shunting Reactors of Transformer Type

LIU Hai-tao, ZHANG Wei-xing, LIU Yu, YANG Ai-xin

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

Abstract: Firstly, it is described in the paper of the basic structure and principle of controllable shunting reactor of transformer type (CSRT) and hybrid controllable shunting reactor of transformer type (HCSRT). Two control modes of TCR and ASVG are compared according to the analysis of their impacts on the power system. Since there exists dead space under TCR mode when having no load or light load, it is proposed in the paper that the first controlled coil should operate at ASVG mode while the other coils should work at TCR mode just in conduction or closed states. Then the sustained conduction method of controllable reactor in multiple parallel branches is applied to CSRT. And its mathematical model is constructed to determine the optimal distribution of reactive power in each winding level of CSRT.

Key words: controllable reactor; transformer type; sustained conduction method; voltage source inverter

1 前言

近年来随着超高压、长距离电网的建设和发展, 特别是西北高压输电线路的建设, 线路对地的充电容量显著增加, 造成轻载和空载时超前无功功率过大而使受端电压上升; 超前电流使电力损耗增大以及切除负荷产生工频过电压等后果。变压器式可控电抗器(controllable shunting reactor of transformer type, CSRT)因其可控性好、响应速度快、谐波含量少而备受关注。混合变压器式可控电抗器(hybrid controllable shunting reactor of

transformer type, HCSRT)在CSRT基础上又做了改进。本文以HCSRT为基本模型, 以简化控制和减少设备装置为目的, 对变压器式可控电抗器的控制绕组容量进行了优化。

2 CSRT和HCSRT的比较

图1为TCR控制方式下的CSRT, T_i 和 X_i 分别为串在控制绕组中的反并联晶闸管和限流电抗器。CSRT类似于二次侧工作于短路状态的多绕组变压器, 要求工作绕组和控制绕组之间有较强的短路阻抗。

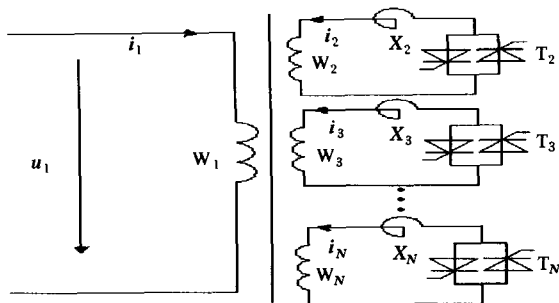


图 1 CSRT 原理图
Fig. 1 Basic structure and working principle of CSRT

工作原理:从空载向额定功率变化的过程中,晶闸管从 T_2 到 T_N 逐次导通,使 W_2 到 W_N 依次工作于短路状态,使工作绕组 W_1 的电流逐渐变大,来增大电抗器的功率。当第 1 个到第 $i-1$ 个控制绕组 $W_2 \sim W_{i-1}$ 都处于短路状态,而第 i 个控制绕组 W_{i+1} 开始工作时,通过控制第 i 个晶闸管 T_{i+1} 的导通角,就可以实现分级平滑调节电抗值,从而可以实现对无功功率的平滑调节。

CSRT 存在的明显缺点是:轻载时将有很大的谐波电流注入电网,特别是在晶闸管导通角在 30° 时,谐波电流含量最大。为减少时谐波含量,第一个控制绕组 W_2 需要从空载直接跳到额定状态,这就使得轻载时存在一段不可调的死区。

文献[2]中提出了 HCSRT,如图 2 所示。HCSRT 采用电压源型逆变器(VSI)代替 CSRT 中的反并联晶闸管,来调节控制绕组的输出。设 W_2 由电压源型逆变器控制,即相当于工作在 ASVG 方式下:当逆变电压低于 W_2 时,工作在感性区域;当逆变电压高于 W_2 电压时,工作在容性区域。通过调节逆变电压与 W_2 电压的幅值相位关系,来实现感性或容性无功的连续补偿调节。ASVG 工作方式与晶闸管控制方式相比,响应速度更快,而且大大减少了输出电流中的谐波畸变率。

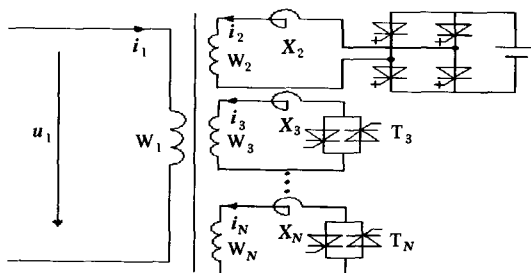


图 2 HCSRT 工作原理图
Fig. 2 Basic structure and working principle of HCSRT

3 多并联支路可控电抗器的支撑导通法

支撑导通法原理如图 3 所示。 n 个相同的可控电抗器并联,每个可控电抗器的额定电流皆为 I/n 。先调节第 1 支路,当负荷电流继续增加超过 I/n 时,将其全部转移到第 2 支路,即第 2 支路处于全导通状态,形成支撑;同时再次打开第 1 支路,在 I/n 到 $2I/n$ 内调节,当电流大于 $2I/n$ 时第 3 支路全导通,形成第 2 个支撑;依此类推。电流由大变小时反向调节即可。此种方法所能限制的谐波电流大小与常规方法相同,但其优点为:仅第 1 支路需平滑调节,而其它支路只需控制相应晶闸管的导通与关闭即可,这就简化了控制接线并减轻了控制装置的工作负担。

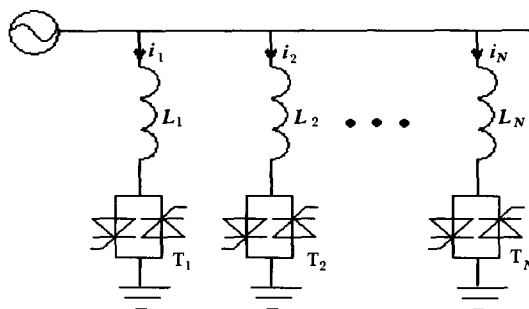


图 3 多并联支路支撑导通法原理图
Fig. 3 Principle of sustained conduction method in multiple parallel branch

4 CSRT 功率控制级数的优化

就 TCR 控制方式下的 CSRT,其二次侧容量最小的绕组采用 ASVG 控制方式,工作于调节状态;其它二次侧绕组采用 TCR 控制方式,仅工作于导通或关断状态。

如图 2 所示,最小容量绕组 W_2 工作于调节状态, $W_3 \sim W_N$ 工作于全导通或全阻断状态。设绕组 $W_2 \sim W_N$ 的额定无功容量为 $Q_2 \sim Q_N$,且 $Q_2 \leq Q_3 \leq \dots \leq Q_N$ 。轻载时负载无功容量 Q_L 小于容量 Q_2 ,通过调节控制绕组 W_2 的逆变器来满足无功容量要求, $W_3 \sim W_N$ 全处于阻断状态;当 Q_L 逐渐增大,大于 Q_2 时,利用并联支路的支撑导通法,对超出 Q_2 范围的部分进行合理的支撑导通转移。如:

$Q_2 < Q_L < 2Q_2, 2Q_2 < Q_L < 3Q_2, \dots, (n-1)Q_2 < Q_L < nQ_2$, 则分别要对无功容量 $Q_2, 2Q_2, \dots, (n-1)Q_2$ 进行支撑导通转移。因此确定 $Q_2 \sim Q_N$ 的大小就成为无功平滑调节和绕组容量设计的

关键。

对绕组额定无功容量的优化可以转化成如下数学模型:

① 绕组 W_2 中连续可调的无功容量 Q_2 , 设其额定值为单位 1, 用字母 a 来代替, a 为 0 到 1 之间的任意数, 即 $0 \leq a \leq 1$;

② 绕组 $W_3 \sim W_n$ 的无功容量 $Q_3 \sim Q_n$ 由整数 $N_3 \sim N_n$ 表示, 且 $1 \leq N_3 \leq \dots \leq N_n$;

③ 可控电抗器的无功容量尽可能大, 即满足 $\max\{1 + N_3 + N_4 + \dots + N_n\}$, 设

$$f_{\max} = \max\{1 + N_3 + N_4 + \dots + N_n\} \quad (1)$$

④ 为实现支撑导通的原则, $0 \sim f_{\max}$ 之间的任意数都可以由 a 与 $N_3 \sim N_n$ 中的数组组合出来。

在条件 ④ 中 $0 \sim f_{\max}$ 之间的任意数 δ , 可分解为整数部分 N 和小数部分 σ , 即 $\delta = N + \sigma$, 整数 N 由 $N_3 \sim N_n$ 表示, 即:

$$N = a_0 N_3 + a_1 N_4 + \dots + a_{n-3} N_n \quad (2)$$

其中 a_0, a_1, \dots, a_{n-3} 为一组不全为零的数; 小数部分 σ 可由 a 表示。

在条件 ①② 的基础上, 满足支撑导通原则 ④ 的 N_i 的所有取值情况如表 1 所示。

表 1 支撑导通原则下 N 的取值情况
Tab. 1 Value of N in the principle of sustained conduction method

N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	...	N_{n-1}	N_n
$0 \sim 1$	1	1	1	1		1	1
		2	2	2		2	2
			3	3		3	3
			4	4		4	4
				5	...	5	5
				6		:	:
				7		:	:
				8		2^{n-4}	2^{n-3}

从表 1 中可以看出, N_i 的最大值为 2^{i-3} , 这是因为 N_2 到 N_{i-1} 的无功容量总和为 2^{i-3} , 若 $N_i > 2^{i-3}$, 当无功需求在 2^{i-3} 与 N_i 之间时, 将无法实现导通支撑转移。

选取各绕组的额定无功容量时, 应遵循下面的原则:

$$N_{i-1} \leq N_i \leq N_2 + N_3 + \dots + N_{i-1} \quad (3)$$

$$(3 \leq i \leq n)$$

同时从表 1 中也可以得出, 对于条件 ③,

$$f_{\max} = \max\{1 + N_3 + N_4 + \dots + N_n\} =$$

$$1 + 1 + 2 + 4 + \dots + 2^{n-3} \quad (4)$$

所以当容量最小的控制绕组一直工作于调节状态

时, 最优的各级绕组额定容量为

$$\begin{cases} N_2 = 1 & (\text{控制绕组}) \\ N_i = 2^{i-3}, & (3 \leq i \leq n) \end{cases} \quad (5)$$

即以调节绕组 Q_2 的无功容量为单位, 各级绕组的额定容量为 $Q_i = 2^{i-3} Q_2, (3 \leq i \leq n)$ 。

在实际应用中, 若变压器式可控电抗器的额定容量 Q 给定, 由公式 (6) 便可以确定二次侧绕组级数和各级额定无功容量。

$$\frac{Q}{f_{\max}} = \frac{Q_2}{1} = \frac{Q_3}{1} = \frac{Q_i}{2^{i-3}}$$

其中 $3 \leq i \leq n$ 。 (6)

以 $Q = 10\,000 \text{ var}$ 为例, 若采用 4 级控制绕组, 即 1 1 2 4 方式, 则 $\frac{10000}{8} = \frac{Q_2}{1} = \frac{Q_3}{1} = \frac{Q_4}{2} = \frac{Q_5}{4}$, 各级绕组额定无功容量分别为: 1 250、1 250、2 500、5 000 (var); 若采用 5 级控制绕组, 则各级绕组额定容量分别为: 625、625、1 250、2 500、5 000 (var)。

绕组控制级数越多, 最小控制无功容量越小, 对电网的谐波污染亦越小。变压器式可控电抗器仅第一控制绕组产生谐波, 其它绕组工作于 TCR 模式下仅处于导通或关断状态, 不产生谐波。因此控制级数越多, 第一控制绕组的容量所占总容量的比例越小, 注入系统的谐波含量亦越小。但控制级数过多, 会使制造和控制过程复杂化, 需要在控制级数和最小无功容量间进行合理的安排。

5 结语

本文主要针对变压器式可控电抗器, 考虑到其产生的谐波对电网的影响, 以简化控制和减少设备为目的, 将无功容量最小的二次绕组工作于 ASVG 调节状态, 其它的二次侧绕组工作于 TCR 状态 (仅导通或关断), 引入支撑导通的概念, 并用数学公式推出建立在支撑导通上的各级无功容量比, 从而确定了最佳的各级绕组无功容量。

参考文献:

- [1] 田铭兴, 励庆孚 (Tian Mingxing, Li Qingfu). 变压器式可控电抗器的谐波分析和功率级数计算 (Harmonic current and power-step number of controllable shunting reactors of transformer type) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2003, 23(8): 168-171.

5 结语

Matlab Notebook、GUI、Simulink 都是 Matlab 软件与电路教学比较好的结合方法,三种方法各有特点,都能够在一定程度上克服传统电路教学方法的弊端。Matlab 软件功能强大,如何在实际教学中进一步发挥 Matlab 在电气类课程教学中的优势还有待于我们继续总结和探索。

参考文献:

- [1] 邱关源. 电路[M]. 北京:高等教育出版社,1999.
- [2] 张志涌. 精通MATLAB6.5版教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003.
- [3] 吴天明,谢小竹,彭彬. MATLAB 电力系统设计与分析[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [4] 李京秀,陈白生(Li Jingxiu, Chen Baisheng). 基于 MATLAB 图形用户界面 GUI 的电路仿真实验的制

(上接第 72 页)

- [2] 钱建华,陈柏超(Qian Jianhua, Chen Bochao). 基于磁阀式可控电抗器的无功补偿系统(The application of reactive power compensator on magnetic-valve controllable reactor in electric railway)[J]. 电力系统及其自动化学报(Proceedings of the CSU-EPSA), 2003, 16(2): 68-72.
- [3] 丁洪发,朱庆春(Ding Hongfa, Zhu Qingchun). 混合变压器式可控电抗器及其仿真(Controllable shunt reactors of hybrid transformer type and its simulations)[J]. 继电器(Relay), 2005, 33(10): 25-30.
- [4] 张俊峰,毛承雄(Zhang Junfeng, Mao Chengxiang). 饱和电抗器特性单片机测试仪研究(Study of single-chip processor instrumentation of saturable reactor property)[J]. 电力系统及其自动化学报(Proceedings of the CSU-EPSA), 2005, 17(2): 61-65.
- [5] 陈禾,陈维贤(Chen He, Chen Weixian). 多并联支路型可控电抗器的支撑导通法(Sustained conduction method of controllable reactor of multiple parallel branch type)[J]. 高电压技术(High Voltage Engineering), 2005, 31(4): 66-68.
- [6] 陈柏超. 新型可控饱和电抗器理论及应用[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社,1999.
- [7] 陈柏超,田翠华,梁柏华,等(Chen Baichao, Tian Cuihua, Liang Baihua, et al.). 单相可控电抗器的一

种谐波抑制原理及实现(Principle and implementation of a harmonic depression approach for single-phase controlled saturable reactor)[J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2002, 22(3): 63-67.

- [5] 徐清超,刘启胜(Xu Qingchao, Liu Qisheng). 基于 MATLAB 和 CAD 的电机教学软件(Electric machinery teaching software based on Matlab and CAD)[J]. 电力系统及其自动化学报(Proceedings of the CSU-EPSA), 2005, 17(4): 94-97.

作者简介:

潘文霞(1961-),女,教授,主要从事电气工程及其自动化教学与科研工作. Email: pwxhh@yahoo.com.cn

范永威(1979-),男,硕士,助理工程师,研究方向为电力系统及其自动化. Email: fywtianyake2003@163.com

陆小花(1981-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统及其自动化. Email: zy-155@sohu.com

种谐波抑制原理及实现(Principle and implementation of a harmonic depression approach for single-phase controlled saturable reactor)[J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2002, 22(3): 63-67.

- [8] Acha E, Ric J J, Acha S, et al. Harmonic modeling in Hartley's domain with particular reference to three phase thyristor controlled reactors [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 14(4): 1622-1628.
- [9] 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.
- [10] Mutluer B, Cadirci I, Ermis M, et al. A unified relocatable SVC for open-cast lignite mining in turkey [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2004, 40(2): 650-663.

作者简介:

刘海涛(1981-),男,硕士研究生,研究方向为电力电子在电力系统中的应用. Email: lht605@163.com

张卫星(1958-),女,硕士研究生,研究方向为电力电子技术. Email: zhangw-xing@sdu.edu.cn

刘瑜(1982-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护. Email: liuyu62@163.com