

基于有理插值算法在无功补偿中的研究

贾文超,史国计,宋恩锋,侯天伟

(长春工业大学 电气与工程学院,吉林 长春 130012)

摘要:电弧炉具有低压、大电流而且负荷非线性的特点,这就决定了无功功率相对较大,运行功率因数低,进行无功补偿是十分必要的。采用 TCR+FC 进行无功补偿得到了越来越多的应用。通过改变触发角来控制电抗器中电流,改变触发角大小,去调节感性无功的大小使电路中感性无功和容性无功相平衡,TCR 型 SVC 控制中触发控制角的计算精度直接影响无功补偿的效果。文中利用有理插值法作为晶闸管触发控制角的计算方法,通过仿真表明该方法具有计算量小、精度高的特点。

关键词:无功补偿; TCR; 有理插值; Matlab 仿真

中图分类号:TF06;TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2009)07-0111-03

Application of Rational Interpolation in Reactive Power Compensation

JIA Wen-chao, SHI Guo-ji, SONG En-feng, HOU Tian-wei

(Electric and Electronic Eng. School, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: Arc furnace is characterized by low voltage and big current and nonlinear load, which determine reactive power becomes bigger comparably and efficiency factor is low too, so it is necessary to do reactive power compensation. Take TCR+FC as reactive power compensation which is more and more popular. Resistor current varies with trigger angle change, it makes capacitive reactive power and inductive reactive power balanced by modifying trigger angle to vary the size of inductive reactive power. The calculation of trigger angle influence the effect of reactive power compensation directly to use TCR type compensation in the SVC. It makes use of the rational interpolation method in the paper, which is used as calculation method for delay angle. It presents calculation volume low, precision high through simulation.

Key words: reactive power compensation; TCR; rational interpolation; Matlab simulation

0 引言

近年来,随着大容量非线性负荷在电力系统中所占的比例的增加,无功补偿受到越来越重视。文中将采用电感电流与触发角之间的关系式来进行分析与控制,传统的控制通常采用等效阻抗作为系统的参考输出^[1],笔者将以电感电流作为系统的输出量,运用有理插值的计算方法,保证了触发控制角的计算精度,从而使无功补偿的效果更好。

1 无功补偿原理

TCR 型 SVC 主要针对电弧炉、轧钢机等冲击性负荷引起的电压波动与闪变、三相不平衡等电网电能质量问题而设计的动态无功补偿^[2]。由于供电线路和变

压器的阻抗主要是感性电抗,多数工业负荷的功率因数角或阻抗角为正,无功功率为正即吸收无功功率。无功功率的变动对电压幅值波动影响较大,这就要求用户对波动性负荷无功功率的变动量进行实时补偿,以改善供电系统的电能质量。补偿器发出容性无功功率即负的无功功率 $-jQ_c$,与负荷吸收感性无功功率 jQ_c 相抵消,使电源只提供有功功率 P 。无功补偿原理如图 1 所示。

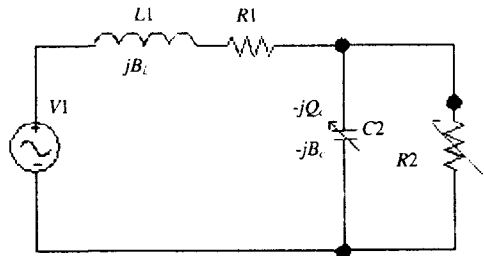


图 1 无功补偿原理图

TCR 型 SVC 通常由晶闸管相控电抗器(TCR)支路和几组 LC 滤波支路组成。SVC 单相等效接线图如

收稿日期:2008-11-06;修回日期:2009-01-16

基金项目:国家科技部支撑计划项目(2007BAE17B02)

作者简介:贾文超(1965-),男,硕士,教授,硕士生导师,研究方向为智能化检测技术。

图 2 所示。

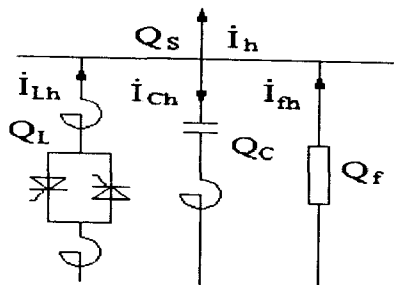


图 2 SVC 单相等效接线图

2 TCR 晶闸管控制角与可控电纳

TCR 的单相基本结构就是两个反并联的晶闸管与一个电抗器串联,通过电抗器 \$L\$ 接到电网上^[3],设支路两端电压为 \$u = \sqrt{2}U\sin(\omega t)\$, \$T_1, T_2\$ 两晶闸管分别在正负半周内导通,控制角为 \$\alpha\$。

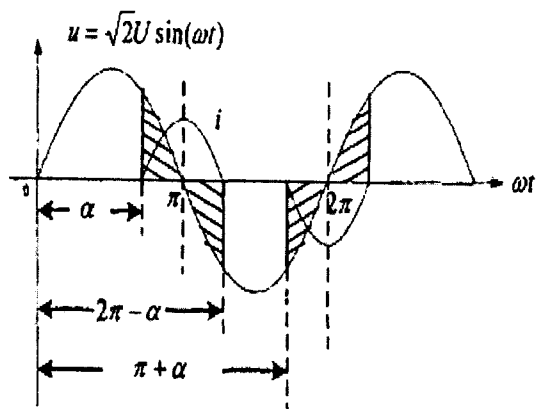


图 3 TCR 单相电压电流波形图

如图 3 所示:当 \$\omega t = \alpha\$ 时, \$T_1\$ 开始导通,电感 \$L\$ 流过的电流通过公式可求得: \$L \frac{di}{dt} = \sqrt{2}U\sin(\omega t)\$, 通过积分转换可得: \$i(t) = \frac{\sqrt{2}U}{\omega L}(\cos\alpha - \cos\omega t)\$。由于晶闸管控制角的整个调控范围是 \$\pi\$ 到 \$2\pi\$ 之间,当 \$\alpha = 90^\circ\$ 时,晶闸管完全导通,导通角 \$\delta = 180^\circ\$,与晶闸管串联的电抗器相当于直接接在电网上,这时其吸收的基波无功电流最大;当触发延迟角在 \$90^\circ \sim 180^\circ\$ 之间时,晶闸管为部分区间导通,导通角 \$\delta < 180^\circ\$。通过傅里叶变化,求得基波电流有效值: \$I_1 = \frac{U}{\pi X_L}(2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha)\$, 当令 \$B_L(\alpha) = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi X_L}\$, 得到 \$I_1 = B_L(\alpha)U\$, 对于基波,晶闸管控制的电抗器可看做一个可控的电纳。在反并联晶闸管完全对称的情况下,TCR 产生的主要是几次谐波,在电流系统中容易消除 3 次谐波,而 5、7、11、13 等次谐波分量已足够小^[4],所以只需考虑基波电纳。TCR 中电感电流的导通时间与电感本身无

关,仅取决于 \$\alpha\$。所以无功补偿就在于得到无功量进而求得补偿电流即可,无功补偿的问题只要精确控制了相位角 \$\alpha\$,也就控制了电流,就可以精确地进行无功补偿了^[5]。另外 TCR 的动态响应好是一个独具的优点,是它被广泛应用的重要原因。

3 晶闸管控制角的算法实现

晶闸管控制角的计算精度直接影响无功补偿的效果。因此,选择合理的计算方法就比较重要,笔者运用反商差有理插值法来实现晶闸管控制角的计算^[6,7]。

可控电纳 \$B_L(\alpha)\$ 与控制角 \$\alpha\$ 的关系用下式求得:

$$B_L(\alpha) = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi X_L} \quad (1)$$

如果取 \$\gamma = 2\alpha, \kappa = \pi B_L(\alpha)X_L - 2\pi\$

$$\text{则有: } \sin \gamma - \gamma = \kappa \quad (2)$$

构造有理插值函数^[8]:

计算 \$n\$ 阶反差商

晶闸管的触发角 \$\alpha\$ 的调控范围是 \$90^\circ \sim 180^\circ\$, 则 \$\gamma = 2\alpha = 180^\circ \sim 360^\circ, \pi \sim 2\pi\$ 在之间取 10 个点 \$\{\gamma_i = x_i, i = 0, 1, \dots, 9\}\$, 根据式(2)可得到对应点集 \$\{f(x_i) = k_i, i = 0, 1, \dots, 9\}\$。

根据反差商计算公式可得数据如表 1 所示:

一般地

$$\varphi(x_0, x_1, \dots, x_{k-1}, x_k) =$$

$$\frac{x_k - x_{k-1}}{\varphi(x_0, x_1, \dots, x_{k-2}, x_k) - \varphi(x_0, x_1, \dots, x_{k-2}, x_{k-1})} \quad (3)$$

为函数 \$f(x)\$ 在 \$x_0, x_1, \dots, x_{k-1}, x_k\$ 处的 \$k\$ 阶反差商。计算反插商可利用反插商公式表:

$$R(x) = f(x_0) + \frac{x - x_0}{\varphi(x_0, x_1)} + \frac{x - x_1}{\varphi(x_0, x_1, x_2)} + \dots + \frac{x - x_{n-1}}{\varphi(x_0, x_1, \dots, x_n)} \quad (4)$$

可以验证它满足插值条件 \$R(x_i) = f(x_i), i = 0, 1, \dots, n\$。并称 \$R(x)\$ 为反差商的有理差值函数。

根据公式(4)有理插值函数 \$R(x)\$: 代入计算所得系数。其中: \$f(x_0) = -3.151717, \varphi(x_0, x_1), \varphi(x_0, x_1, x_3)\$, 等系数值为表中对角线上的数值。

下面验证所构造有理插值函数 \$R(x)\$ 的精度在 \$\gamma = \pi \sim 2\pi\$ 的范围内任取若干点 \$\{\gamma_i = x_i (i = 0, 1, 2, 3, 4)\}\$ (取五个点), 根据式(2)取出对应的值 \$k_i\$, 即 \$\{k_i = f(x_i) (i = 0, 1, 2, 3, 4)\}\$ 再代入 \$R(x)\$, 如表 2 所示。

从表 2 中可以看出即在 \$\pi \sim 2\pi\$ 中, 逼近值的精度很高, 可达到 \$10^{-7}\$ 级。

表 1 反差商有理插值公式表

x_i	$f(x_i)$	一阶反 差商	二阶反 差商	三阶反 差商	四阶反 差商	五阶反 差商	六阶反 差商	七阶反 差商	八阶反 差商	九阶反 差商
3.14 6655	-3.15 1717									
3.50 2312	-3.85 5259	-0.50 5523								
3.81 5621	-4.43 9759	-0.51 9367	-4.83 2173							
4.15 8776	-5.00 9398	-0.54 4830	-16.7 0094	-0.02 8912						
4.46 4232	-5.43 3599	-0.57 7408	-13.3 8137	-0.07 5868	-6.50 4962					
4.78 6423	-5.78 3684	-0.62 3020	-10.9 2888	-0.15 9234	-4.81 6125	0.19 0777				
5.10 2634	-6.02 7450	-0.68 0167	-9.16 3338	-0.29 7152	-3.51 8707	0.21 3780	13.7 4651			
5.46 3158	-6.19 4322	-0.76 1355	-7.66 4585	-0.58 1673	-2.35 9758	0.24 0984	13.4 7890	-1.34 7199		
5.82 4325	-6.26 7252	-0.85 9472	-6.56 0304	-1.12 7655	-1.51 5868	0.27 2613	12.6 8271	-0.67 8408	0.54 0030	
6.15 3462	-6.28 2822	-0.96 0302	-5.82 9535	-2.33 7841	-0.86 3901	0.29 9453	12.5 7903	-1.16 7833	3.84 8578	0.09 9481

表 2 有理插值精度表

$\gamma_i = x_i$	3.61	3.92	4.21	4.94	5.97
$\kappa_i = f(x_i)$	-4.061466	-4.622146	-5.086435	-5.914208	-6.278091
$R(\kappa)$	3.6100032	3.9199981	4.200008	4.940015	5.970135
差值 δ	0.0000032	-0.0000019	-0.000002	0.000015	0.000135
误差 ϵ	8.86×10^{-7}	4.84×10^{-7}	4.7×10^{-7}	3.04×10^{-6}	2.26×10^{-5}

4 仿 真

由于 TCR 触发角和电抗器电流是二元函数关系, 所以利用二元有理插值法。在 Matlab 下函数曲线和 $\sin \gamma - \gamma = \kappa$ 逼近函数曲线 $R(x)$ 利用 plot(x, y) 得到拟合图形如图 4 所示。

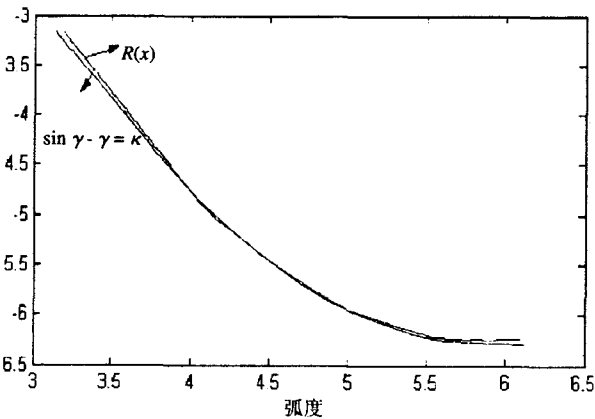


图 4 TCR 触发角与电纳函数曲线与逼近函数曲线

5 结束语

(1)看到所建立的反差商有理差值函数是很逼近

所求晶闸管控制角与电纳函数曲线。可以计算得到比较准确的补偿电流值,从而无功补偿量不会出现较大偏差。

(2)在分析非线性负载的无功补偿时,有理插值法是很有效的计算方法,计算量很小、精度很高,会使程序更加简洁、执行效率更高。

参考文献:

[1] 赵启升,赵乃成. 铁合金生产实用技术手册[M]. 北京:冶金工业出版社,1976.

[2] 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 Transactions on Power Delivery, 2000, 15(4):1225 - 1231.

[3] Dehnavi G R, Shayanfar H A, Mahdavi J, et al. Some New Aspect of Design and Implementation of TCR for Load Balancing and Power Factor Correction in Distribution Systems [C]// In: IEEE, IEEE Porto Power Tech Conference. Portugal: IEEE, 2001:109 - 114.

图像有毛刺的情况下,两者表现就大不一样了,前者还是可以良好地体现文字的结构特征,而后者则多了太多的小圈,这非常不利于识别特征的提取。在手写识别的系统中,图像是扫描的,图像质量肯定会层次不齐,因此基于主曲线算法的适应鲁棒性较基于模板的好得多,这点对于手写识别系统很重要^[6]。

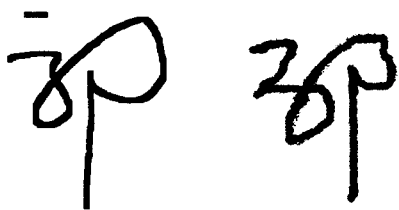


图 2 平整和毛刺原图

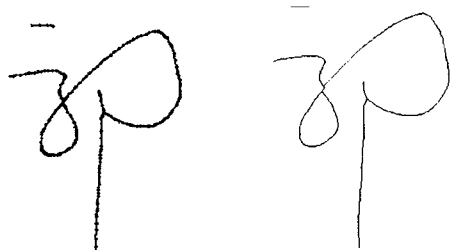


图 3 平整图主曲线和 Hilditch 提取

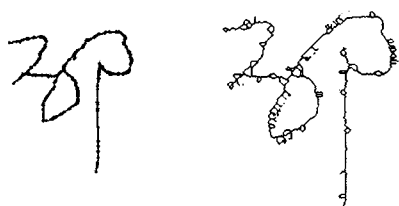


图 4 毛刺图主曲线和 Hilditch 提取
两者之间的比较:

(1)传统的基于模板算法提取后的骨架,如果要提取其特征,由于图像是以位图点阵的格式存储的,在提取过程中,必须要对整幅图像进行扫描,这样会带来时间复杂度的提升。而使用基于主曲线提取的骨架图像,它是以以矢量形式存储的,这样在特征提取时,不仅带来了性能上的提升,而且还大大方便了特征提取。

(2)传统基于模板的细化算法操作对象是像素,如

果图像质量差、毛刺多,则细化后的图像效果极差。而主曲线算法则反之,它提取的是数据集分布,所以鲁棒性更好,在手写识别过程中,对于质量差的图片识别率将提高不少。

(3)由于主曲线提取的是汉字的骨架,而非脊梁骨,所以更能准确地反映字符的整体拓扑结构,在此基础上提取的特征比基于模板提取得到的特征不但数量少而且要更加准确。这将对提高字符识别率有很大帮助。

(4)由于在提取主曲线时,需要对大量数据进行投影运算,所以其时间效率比基于模板细化差,这方面还有待进一步研究。

4 结束语

提取骨架是特征提取的重要课题之一。分析两类细化算法,并比较,可以看出基于主曲线提取算法质量较好,但是目前对于其时间效率还是不太满意,对于实时性较高的系统还是无法应用,这方面还有待于进一步提高。

参考文献:

- [1] 张军平,王 珏.主曲线综述[J].计算机学报,2003,26(2):129-146.
 - [2] Kegl B, Krzyzak A, Tomes R. Piecewise linear skeletonization using principal curves[J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(1): 59-74.
 - [3] 史绍强.一种改进型的汉字字符图像细化算法[J].计算机技术与发展,2007,17(9):88-91.
 - [4] Kegl B, Krzyzak A, Cursil T. A polygonal Line algorithm for constructing principal curves[C]// Proceedings of Neural Information Processing System. Denver Colorado, USA: [s. n.], 1999: 501-507.
 - [5] 史绍强,王英健,唐贤瑛.基于整形特征和模糊识别的手写体汉字识别[J].微机发展(现更名:计算机技术与发展), 2004, 14(1): 114-116.
 - [6] 何 斌,马天予,王运坚,等. Visual C++ 数字图像处理[M].北京:人民邮电出版社, 2001.
-
- (上接第 113 页)
- [4] 王兆安,杨 君.谐波抑制和无功功率补偿[M].第 2 版.北京:机械工业出版社,2006.
 - [5] Zhang Haibo, Chen J Y, Xiong Xianping, et al. Computer-based monitoring system of static var compensator[C]// International Conference on Power System Technology. [s. l.]: IEEE, 2002: 1904-1907.
 - [6] 李庆庆,张燕平.基于模糊边缘检测算法的车牌定位[J].计算机技术与发展,2006,16(12):7-8.
 - [7] 李付鹏,汪继文.几种复合型数值方法的算法模拟与性能比较[J].微机发展(现更名:计算机技术与发展),2004,14(1):12-14.
 - [8] Numberger G. Approximatively Spline Functions[M]. Berlin:Spring Verlag, 1989.