

2003

科技学术论文集

现代测量与控制技术

Modern Measure & Control Technology



昆明西部科技学术交流协会
云南省科技学术交流中心

原子能出版社

前 言

随着信息革命的兴起和信息时代的到来，世界各国正在掀起一场迅猛的信息化浪潮，世界经济因此而呈现出以信息化为根本特征的崭新面貌。而信息技术又是建立在测量与控制技术、计算机技术、通信技术三大基石上的。事实上，作为信息技术主要支柱之一的测量与控制技术早已渗透到人类生活、生产和社会活动的各个领域。人类对以测量与控制技术为重要内容的自动化技术的依赖性已经越来越强。

随着社会的进步，知识更新的周期越来越短，需要观测和控制的参数越来越多，信息量也越来越大。这些信息的搜集、传递和处理，最优控制策略的实现，都必须借助于先进的测量与控制技术。测量与控制技术不仅适用于工程系统，同时也适用于经济、社会等非工程系统，其应用范围远远超出了人们的想象。因此，测量与控制技术在未来世界将扮演着更加重要的角色。

“全国测量与控制技术学术研讨会”自筹备以来得到社会各界的大力支持。在此期间，我们收到论文 100 余篇，通过优选和加工，编辑成《现代测量与控制技术》一书，由原子能出版社出版并奉献给与会代表和相关作者。全书共收录论文 80 篇，内容涉及到测量与控制技术的控制理论与应用、自动化综合技术、现场采集与监测技术、故障诊断技术、仪器仪表与传感器及现代信息技术。其中，有一部分论文属于国家自然科学基金项目和省部级自然科学基金项目，研究层次和水平都较高。全书材料丰富、内容新颖、覆盖面广、信息量大，具有很大的实用价值和借鉴作用，必将对测量与控制技术的研究与发展起到积极的促进作用。

在本书的编辑出版过程中，广大论文作者、昆明西部科技学术交流协会、云南省科技学术交流中心以及原子能出版社等单位的专家和工作人员为此付出了辛勤劳动。在此，云南省科技学术交流中心谨向他们表示衷心的感谢，并希望从事测量与控制技术的专家学者对本书提出宝贵意见。

云南省科技学术交流中心

2003 年 7 月

目 录

· 控制理论与应用 ·

数据采集系统中的 RC 有源滤波器优化综合技术	余水宝	郑金菊	(1)		
包含静止无功发生器的电力系统鲁棒镇定控制	张 敏	周少武	(6)		
模糊控制及应用	沈 容	李淑兰	杨玉芬	阮慧丽	(14)
基于小生态遗传算法的多峰优化技术	谭竹梅	郭观七	(18)		
利用模糊控制器进行倒立摆控制的方法	赵元立	杨 斌	林雪原	李廷军	(24)
基于能量平衡原理的机炉负荷协调控制方法	郭巧菊	朱国瑜	郑志波	冯永兵	(29)
自动控制系统中的非线性效应及处理方法				鲁豫奇	(38)
大功率半导体激光器的驱动与控制	单江东	邓 军	田小建	(44)	

· 自动化综合技术与应用 ·

发展中的测量与控制技术	姚建国	李淑兰	(49)			
应用 Modelica 进行倒摆系统的数字控制仿真	汤炳新		(52)			
计算机仿真在温度控制系统中的应用	沈 容	杨玉芬	李淑兰	刘庆红	(57)	
氢能发电机的水管理系统	孙常东		(61)			
基于 ADAM-5511 的锅炉控制系统	姬春慧	赵永生	(64)			
装备的虚拟环境操作与拆装训练系统	贺 菁	王新赛	(67)			
基于 Internet 对 LONWORKS 控制网络的远程临控	侯 叶		(72)			
电子警察—机动车闯红灯抓拍系统	杜思深		(77)			
单片机控制系统中的抗干扰技术及应用	杜思深	张德纯	王兴亮	(83)		
配电变压器监测与控制系统的應用	张贵山	刘 颖	赵碧光	朱 春	(88)	
焦化制气厂备煤监控系统的设计和应用						
.....	周永旺	袁应文	季 岗	朱翠兰	石川云	(93)
可编程控制计算机监控系统在锅炉程控点火中的应用	倪桂杰	刘国宏		(99)		
高压加热器水位控制的改造	宋晓凤		(102)			
给水自动调节系统	宋晓凤		(104)			
用组态软件实现交互式界面控制	武智璞	王仲初	(109)			
高压变频器的网络功能设计	赵黎明	张 冰	王仲初	(115)		
MSP-G320240 液晶显示模块在体外反搏仪中的应用	刘阿娟	刘金琪	(122)			

基于 PCI 总线的可互换式虚拟仪器测试系统设计	魏忠林	黄考利 (128)
远程监控系统中实时数据库的 VB 设计与实现	王文理	黄永平 (132)
连续产出式浓硝酸高压反应釜容错控制	洪 滨	(135)

· 现场采集与监测技术 ·

CAN 总线技术及在机器人控制系统中的应用	李 斌	吴镇炜	钟 华	汪 洋 (144)
定子绝缘在线监测与发电机状态维修				施惠昌 (148)
扭力轴扭矩、转速光学测试技术的研究				欧 扬 (152)
计算机辅助变速箱质量检测系统	王占军			汤炳新 (155)
准同步窗及其在失真度测量中的应用	陈淑红			袁晓峰 (161)
一种基于 PC-DAQ 的相位差测量方法	汪旭东	李世平	彭艳朝	王长利 (167)
利用小波变换理论进行动态测试及信号分析	杨玉芬	沈 容		李椒兰 (171)
HY6070 在检测信号数据采集与处理中的应用	胡 隽	何辅云		杨 平 (174)
一种新型便携式 γ 谱数据采集系统设计与实现				
.....	胡宾鑫	方 方	张雄飞	马英杰 (178)
一种多参量试验数据的处理算法	牟俊林	隋英华		王连生 (184)
基于 PMAC 的近场测量数控系统	李 勇	毛乃宏		张士选 (189)
测试软件的通用性设计	柳爱利	吴进华		齐玉东 (194)
基于 VXI 总线的导弹通用测试系统	柳爱利	吴进华		齐玉东 (198)
火炮膛压变化曲线测试研究	何福友	马爱文	何 英	何 强 (201)
KQ-100D 电力载波模块应用中若干问题的研究	张志国	何福友		李德良 (206)
基于 GPIB 体系结构的振动仪器测试系统	袁应文	季 岗		周永旺 (211)
MATLAB 在某种压力波形分析中的应用	黄琦志	黄琦兰		李 轲 (216)
心电信号检测与体外反搏控制系统设计	吕瑞丰	许万平		肖煜东 (219)
拟 Poisson 过程与体视学中的抽样误差估计	何 艳	李玲娜		姚恒中 (224)
VXI 总线系统在大型热工实验装置上的应用				
.....	周仁明	郎雪梅	刘 军	党 岩
				杨 光
				杨晓辉 (227)
计算机辅助 B 超图像的量化分析	刘 敏	李芬华		田 星 (232)

· 故障诊断技术 ·

基于 PC/104 总线的电子设备故障诊断系统设计	黄允华	程兴亚	黄中宁 (236)
状态监测和故障诊断技术的现状与展望			吴 凡 (240)
变电站综合自动化系统雷击事故分析及防雷措施的探讨			罗一镔 (245)
基于 VXI 总线技术的导弹自动测试与故障诊断系统研究	连光耀		黄考利 (248)

武器装备故障诊断系统原理与实现	姚建国	洪 权	(252)
混沌和分形理论在供配电系统故障诊断中的应用	颜 宁	李 之	(255)

• 仪器仪表与传感器 •

基于虚拟仪器的功率分析系统设计与应用	陈冠玲	汪敏生	王亚飞 (261)
单片机相位差检测原理分析	任建存	张 力	李廷军 宋立彤 (265)
激光延伸率仪控制系统设计	牟俊林	王连生	隋英华 (269)
微加速度计的噪声特性分析		胡红革	黄大贵 (273)
机械密封研究测试技术进展		胡小云	宋鹏云 (278)
传感器技术的发展		阮慧丽	王何林 (284)
多传感器信息融合技术在电力系统的应用前景探讨		王文志	余 芳 (288)
Bragg 光纤光栅法布里—珀罗传感器应变测量的研究			张 健 (293)
数字示波器控制软件 TESTCONTROL 的开发与应用	蒲明辉	黄琦志	田 耕 (300)
脑功能光学成像中的空间独立成分分析		李 勇	李鹏程 (306)
基于装备调试的时变幅度选择器设计与应用		陈小于	洪 权 (312)
载车底盘测试仪研制简介			洪 权 (316)
PIC 单片机控制视力测试仪的研究			李荣正 (320)

• 现代信息技术 •

产品数据管理技术在敏捷制造中的应用	黄利平	李春波	戴永长	许隆文 (325)
基于优化决策树理论的数据挖掘模型与应用	张维东	沈建平	朱宏明	(330)
网络布线及日常维护中的规范与技巧			王仕林	(336)
信息融合技术在微小卫星姿态确定上的应用		刘述田	刘 昆	(340)
基于网络技术的电力网电能损耗在线管理系统			崔凤亮	(345)
网络化测试系统技术研究与实现			李凤保	(350)
实现客户—服务器之间的通信			王 鹰	(355)
《通信原理》远程网络教学课件的设计	王兴亮	张德纯	赵 燃	(369)
机械设计及其 CAD 系统	刘庆红	阮海斌	阮慧丽	王何林 (376)
局域网内批量硬盘的克隆		胡持平	胡维平	(379)
模块化编程语言 LLwin 与创意组合模型在机电控制设计中的应用.....				
.....	胡持平	戴 娟	段振华	(383)
移动机器人的导航系统		戴 娟	胡持平	(388)

数据采集系统中的 RC 有源滤波器 优化综合技术

余水宝 郑金菊

(浙江师范大学 浙江·金华 321004)

摘 要 本文给出了基于 Butterworth 传递函数的二阶和状态变量 RC 有源滤波器的优化综合实例,其特点是实现电路简洁,网络参数易确定,调试方便,截止频率解析式明确,且有较好的精度。其电路和设计方法,在数据采集和工程测试等领域,有较好的应用参考价值。

关键词 Butterworth 传递函数 有源滤波器 阻尼系数 状态变量 优化综合

1 引言

滤波技术是数据采集和工程测试领域的重要环节,如 A/D 采样前的抗混叠滤波和 D/A 转换后的平滑滤波。滤波网络的理论逼近问题,早在上个世纪的三四十年代就已解决^[1],但滤波器的综合技术,由于其网络元件参数的实际选择和调试的困难,一直没有得到长足的发展。近年来虽然有开关电容式专用集成滤波芯片问世,但其价格不菲,电路噪声也不尽人意。

国内有许多学者对 RC 有源滤波器综合有过卓有成效的研究^[2]。本文提出的基于 Butterworth 传递函数的 RC 有源滤波器优化综合技术,指的是其实现电路较简洁;或者是网络参数易确定,且调试方便;抑或是滤波器有确定的截止频率解析式,且有较好的精度。在数据采集、信号处理和实时工控等领域,均有积极的实际意义。

2 二阶 Butterworth RC 有源滤波器优化综合

二阶滤波,是实现高阶滤波网络的积木块。Butterworth 滤波网络,又称“最平坦幅频特性”滤波网络。式(1)是二阶 Butterworth 归一化滤波网络的传递函数:

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + \sqrt{2}s + 1} \quad (1)$$

令 $s = s/\omega_0$ 代入上式得

$$H(s/\omega_0) = \frac{1}{s^2 + \sqrt{2}s + 1} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \sqrt{2}\omega_0 s + \omega_0^2} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (2)$$

式中的 ξ 为系统阻尼系数, ω_0 为系统固有角频率。当 $\xi = \sqrt{2}/2 = 0.707$ 时, 称为最佳阻尼系数, 此时系统的幅频特性也最为平坦。显然, 二阶 Butterworth 传递函数是取得最佳阻尼系数的传递函数。

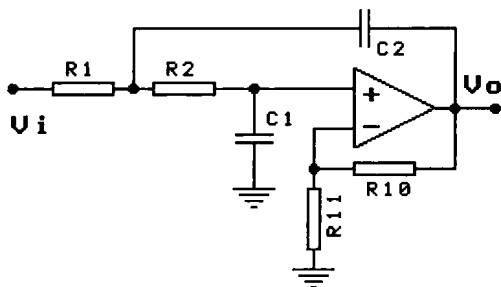


图1 二阶 RC 有源滤波器原理电路

图1 为一款由集成运放实现的二阶低通 RC 有源滤波器原理电路, 其传递函数为:

$$H(s) = \frac{K_0 / R_1 R_2 C_1 C_2}{s^2 + \left(\frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2} + \frac{1 - K_0}{R_2 C_1} \right) s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (3)$$

式中 $K_0 = 1 + R_{10} / R_{11}$ 为电路直流增益。对比 (3) 式和 (2) 式, 有电路固有角频率

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}, \text{ 电路阻尼系数:}$$

$$\xi = \frac{1}{2} \left[\sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}} + \sqrt{\frac{R_1 C_1}{R_2 C_2}} + (1 - K_0) \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}} \right] \quad (4)$$

电路阻尼系数是一个重要的参数, 传递函数的两个极点均由阻尼系数 ξ 所表征, 它对系统在整个频域内能否稳定工作起着决定性的作用。阻尼系数 ξ 越小, 在 s 平面内越靠近虚轴, 系统越不稳定。因此我们的任务是既要使阻尼系数取得 0.707 的最佳值, 又要使阻容参数选择和调试方便, 同时还要保证截止频率 f_0 有较规范的解析式。

令 (4) 式中的 $K_0 = 2$, 即 $R_{10} = R_{11}$, 同时取 $C_1 = C_2$, 此时有 $\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}$, 显然取

$R_2 = 2R_1 = 2R$, 阻尼系数就取得 0.707 的最佳值。

令 (4) 式中的 $K_0 = 1$, 即 $R_{10} = 0, R_{11} = \infty$, 同时取 $R_1 = R_2$, 此时有 $\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$, 显然取

$C_2 = 2C_1 = 2C$, 阻尼系数就取得 0.707 的最佳值。

图 2 分别为它们的两款实现电路原理,前者电路电容较为好取,且有两倍的直流增益,后者电路则电阻较为好取,且便于实现程控滤波。它们的截止频率均为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{2RC}} \quad (5)$$

一般来说,同一型号的电阻和电容,有相近的电性能参数,巧的是图 2 电路中的阻尼系数 ξ ,均为电阻或电容的比值,因此有较好的稳定性。

还需说明的是将图 2 电路的阻容位置互换,就成了具有相同形式的高通二阶 Butterworth RC 有源滤波器。

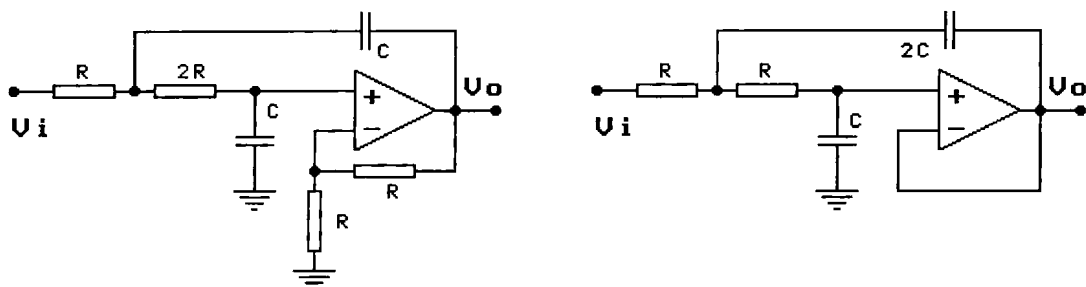


图 2 二阶低通 RC 有源滤波器电路原理

3 RC 有源状态变量滤波器优化综合

图 3 为一款二阶 RC 有源状态变量滤波器电路原理,从三个运算放大器的输出端,可同时获得高通、带通和低通的滤波函数,分别为:

$$Hp(s) = \frac{\frac{R_5 + R_6}{R_5} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot s^2}{s^2 + \frac{R_5 + R_6}{R_5} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \frac{s}{R_7 C_3} + \frac{R_6}{R_5} \cdot \frac{1}{R_7 R_8 C_3 C_4}} \quad (6)$$

$$Bp(s) = \frac{\frac{R_5 + R_6}{R_5} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \frac{s}{R_7 C_3}}{s^2 + \frac{R_5 + R_6}{R_5} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \frac{s}{R_7 C_3} + \frac{R_6}{R_5} \cdot \frac{1}{R_7 R_8 C_3 C_4}} \quad (7)$$

$$Lp(s) = \frac{\frac{R_5 + R_6}{R_5} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \frac{1}{R_7 R_8 C_3 C_4}}{s^2 + \frac{R_5 + R_6}{R_5} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \frac{s}{R_7 C_3} + \frac{R_6}{R_5} \cdot \frac{1}{R_7 R_8 C_3 C_4}} \quad (8)$$

仔细考查上述三个传递函数,发现它们有相同的分母,即有相同的阻尼系数,因此当我们取 $C_3 = C_4 = C, R_5 = R_6 = R, R_3 = R_4 = R$ 时,就有 $2\xi = \sqrt{R_8 / R_7}$ 的满意结果,令

$R_8 = 2R_7 = 2R$, 则系统取得最佳阻尼系数, 此时高通、低通的截止频率和带通的中心频率均为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_7 R_8 C_3 C_4}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2}RC} \quad (9)$$

传递函数也简化为:

$$H_p(s) = \frac{s^2}{s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{2R^2 C^2}} \quad (10)$$

$$B_p(s) = \frac{\frac{s}{RC}}{s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{2R^2 C^2}} \quad (11)$$

$$L_p(s) = \frac{\frac{1}{2R^2 C^2}}{s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{2R^2 C^2}} \quad (12)$$

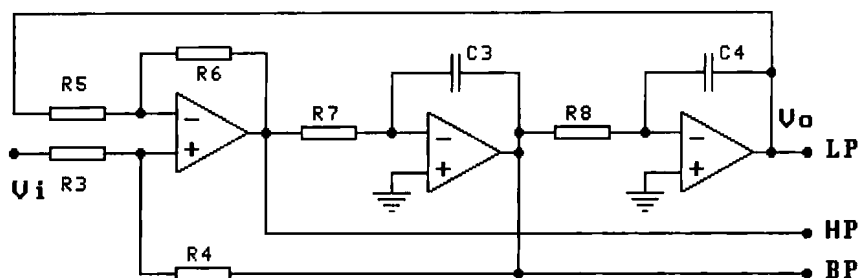


图3 RC有源状态变量滤波器电路原理

4 设计举例

以状态变量滤波器为例, 设要设计的截止频率和中心频率为 1KHz, 根据式 (9), 取电容为 $0.1\mu\text{F}$, 则电阻为 $R_7=1.125\text{K}\Omega$, $R_8=2.25\text{K}\Omega$ 。图 4 为 RC 有源状态变量滤波器幅频特性的归一化仿真实验曲线, 由曲线可知, 它与理论计算吻合得很好。

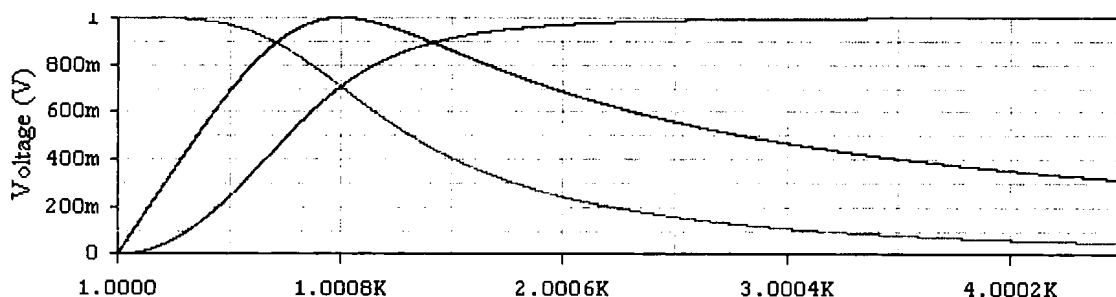


图4 RC有源状态变量滤波器幅频特性

5 结束语

本文给出的几款 RC 有源滤波器的共同特点是电路简洁,有简洁明了的频率解析式,网络参数调试方便,且有较好的精度,同时均通过实验验证,性能稳定,电路噪声小,笔者已在多种场合得以应用。

参考文献

- 1 余水宝. 一种实现偶数高阶滤波网络的新方法. 北京: 电子测量与仪器学报, 1999, No.1
- 2 余水宝. 高阶有源滤波网络的优化综合及其应用. 北京: 科技通报, 2001, No.2
- 3 郑君里. 信号与系统. 北京: 北京高等教育出版社, 1981
- 4 黄席春. 滤波器综合法设计原理. 北京: 北京人民邮电出版社, 1978

包含静止无功发生器的电力系统 鲁棒镇定控制*

张 敏 周少武

(湘潭工学院信息与电气工程系 湖南·湘潭 411201)

摘 要 研究包含静止无功发生器 (STATCOM) 的单机-无穷大电力系统鲁棒镇定控制。首先, 从系统级角度讨论了系统的动态数学模型。为消去系统非线性, 引入了直接反馈线性化技术, 考虑到系统的参数不确定性, 所得到的系统模型为一个包含不确定项的线性系统。基于系统的代数黎卡提方程的解, 对上述线性系统, 引入反馈控制 $v = -Ku$ 。结合前述的直接反馈线性化技术给出的补偿控制规律, 得到原系统的鲁棒镇定控制器。在仿真实例中, 考虑了在反馈线性化补偿控制规律中有无静止无功发生器的附加控制作用两种不同的情形。输电线路发生三相对称短路故障, 在此暂态过程中, 考察所给控制器的控制效果。

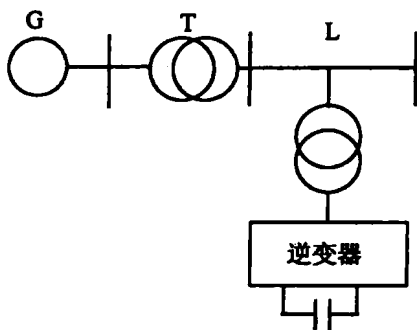
关键词 静止无功发生器 单机-无穷大系统 鲁棒镇定控制 黎卡提方程

1 引言

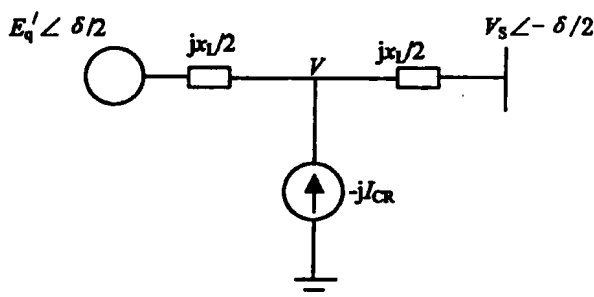
灵活交流输电系统的应用为电力系统提供了一种新的控制手段, 它在提高系统稳定性、改善系统阻尼及潮流控制等方面发挥着重要作用。静止无功发生器是灵活交流输电系统的重要成员。但是, 当其在电力系统中运行时, 若不能了解它同系统其他部分的相互作用, 与其他部分没有良好协调的控制方法, 将严重制约其性能的发挥, 起不到应有的作用。由于静止无功发生器 (STATCOM) 模型本质上存在非线性和不确定性, 在对其控制规律的设计研究中, 考虑上述这些因素是非常重要的。文献[1]、[2]、[3]对此作了有益的尝试, 它们利用非线性系统的微分几何理论设计了 STATCOM 的非线性控制规律, 这些控制规律能改善系统暂态稳定性, 电压稳定性, 为系统提供有效的阻尼作用。文献[4]基于哈密顿系统理论, 提出了 STATCOM 控制的电力系统的暂态稳定分析新方法。但一般而言, 上述文献或者只提供了对 STATCOM 本身的控制规律, 或者未考虑系统的非线性或不确定性, 因此在包含 STATCOM 的电力系统的控制规律的设计中考虑上述多方面的问题, 将是非常有意义的一项工作, 本文将按以下内容进行组织, 在第2节中考虑在有 STATCOM 存在的情形下, 给出单机的无穷大电力系统数学模型; 在第3节中将利用文献[5]的方法, 讨论一种直接反馈线性化补偿控制, 将模型补偿为线性系统; 在第4节中, 将讨论以上述线性化模型为基础的鲁棒镇定控制; 在第5节中, 将讨论一个实例, 并给出仿真结果; 最后, 给出本文的结论。

* 湖南省自然科学基金资助课题 (02JJY2095)

2 系统动态模型



(a) 包含 STATCOM 的单机-无穷大系统



(b) 等值电路

图 1 包含 STATCOM 的单机-无穷大系统及其等值电路

图 1 为具有 STATCOM 单机-无穷大系统, STATCOM 由电压型逆变器、电压支撑电容、连接变压器或电抗器等部分组成。本文将从系统级的角度来处理 STATCOM, 因而将其等效为一个无功电流源, 并接于输电线路电气中点, 由电路理论不难得到以下关系

$$V = E'_q \cos \frac{\delta}{2} + \frac{X_L}{4} I_{CR} \quad (1)$$

发电机采用二阶简化模型 (摇摆方程), 可得包含 STATCOM 的单机-无穷大系统动态模型为

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= -\frac{D}{M} \omega + \frac{\omega_0}{M} (P_m - P_e) \end{aligned} \quad (2)$$

电路动态方程

$$\dot{E}'_q = -\frac{1}{T'_{do}} E'_q + \frac{1}{T'_{do}} u_f \quad (3)$$

发电机输出电磁有功功率和无功功率分别为

$$P_e = E'_q V \cdot \frac{2 \sin \frac{\delta}{2}}{X_L} = \frac{E_q'^2}{X_L} \sin \delta + \frac{1}{2} E'_q I_{CR} \sin \frac{\delta}{2} \quad (4)$$

$$Q_e = -E'_q V \cdot \frac{2}{X_L} \cos \frac{\delta}{2} = -\frac{2}{X_L} E_q'^2 \cos^2 \frac{\delta}{2} - \frac{1}{2} E'_q I_{CR} \cos \frac{\delta}{2} \quad (5)$$

其他代数方程为

$$E_q = E'_q - (X_d - X'_d) I_d \quad (6)$$

$$I_q = V \frac{2}{X_L} \cos \frac{\delta}{2} = \frac{2}{X_L} E'_q \cos^2 \frac{\delta}{2} + \frac{1}{2} I_{CR} \cos \frac{\delta}{2} \quad (7)$$

$$I_q = V \frac{2}{X_L} \sin \frac{\delta}{2} = \frac{E'_q}{X_L} \sin \delta + \frac{1}{2} I_{CR} \sin \frac{\delta}{2} \quad (8)$$

$$E_q = X_{ad} I_f \quad (9)$$

式中, δ : 发电机功角; ω : 发电机转速; P_m : 输入机械功率; P_e : 电磁功率; ω_0 : 同步转速; D : 阻尼系统; M : 机组惯性常数; E'_q : 交轴暂态电势; E_q : 交轴电势; U_f : 励磁电压; T_{d0}' : 直轴暂态短路时间常数; X_d : 机组直轴电抗; X_d' : 机线直轴暂态电抗; X_L : 线路(含变压器)电抗; Q : 无功功率; I_f : 励磁电流; I_d : 直轴电流; I_q : 交轴电流; X_{ad} : 机组励磁绕组和定子绕组互电抗。

方程(1)、(2)、(3)组成包含 STATCOM 的单机无穷大电力系统动态数学模型。由方程可见, 系统包含非线性因素, 这对于设计系统控制器是一个问题。此外, 我们还将以下的讨论中, 考虑系统存在的不确定因素。

3 直接反馈非线性补偿

对系统模型(1)、(2)、(3), 我们引入反馈非线性补偿。以消去机组非线性, 对(4)式求导, 并由(8)式、(5)式得

$$\begin{aligned} \dot{P}_e &= \dot{E}'_q V \frac{2}{X_L} \sin \frac{\delta}{2} + E'_q V \frac{2}{X_L} \sin \frac{\delta}{2} + E'_q V \frac{1}{X_L} \cos \frac{\delta}{2} \omega \\ &= E'_q I_q + E'_q V \frac{1}{X_L} \cos \frac{\delta}{2} \omega + E'_q V \frac{2}{X_L} \sin \frac{\delta}{2} \dot{\omega} \\ &= \dot{E}'_q I_q - \frac{1}{2} Q_e \omega + E'_q V \frac{2}{X_L} \sin \frac{\delta}{2} \dot{\omega} \end{aligned} \quad (10)$$

由(3)、(6)

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}} (u_f - E_q) = \frac{1}{T'_{do}} [u_f - E'_q + (X_d - X'_d) I_d]$$

代入(10), 并令 $\Delta P_e = P_e - P_m$, 并考虑到 $E'_q I_q = P_e$, 得

$$\begin{aligned}
\dot{P}_e &= \frac{1}{T'_{do}} [u_f - E'_s + (X_d - X'_d) I_d] I_q - \frac{1}{2} Q_e \omega + E'_q \dot{V} \frac{2}{X_L} \sin \frac{\delta}{2} \\
&= \frac{1}{T'_{do}} [(u_f - (X_d - X'_d) I_d) I_q - P_e] - \frac{1}{2} Q_e \omega + E'_q \dot{V} \frac{2}{X_L} \sin \frac{\delta}{2} \\
&= \frac{1}{T'_{do}} [(u_f + (X_d - X'_d) I_d) I_q - P_m - \frac{1}{2} T'_{do} Q_e \omega] - \frac{1}{T'_{do}} \Delta P_e + E'_q \dot{V} \frac{2}{X_L} \sin \frac{\delta}{2}
\end{aligned} \quad (11)$$

在 (11) 式中

$$\dot{V} = \dot{E}'_q \cos \frac{\delta}{2} - \frac{1}{2} E'_q \sin \frac{\delta}{2} \cdot \omega + \frac{1}{4} X_L \dot{I}_{CR}$$

于是

$$E'_q \dot{V} \frac{2}{X_L} \sin \frac{\delta}{2} = \frac{1}{X_L} E'_q \dot{E}'_q \sin \delta - \frac{1}{X_L} E'^2_q \sin \frac{\delta}{2} \cdot \omega + \frac{1}{2} \dot{I}_{CR} E'_q \sin \frac{\delta}{2}$$

代入 (11) 式, 得

$$\begin{aligned}
\dot{P}_e &= \frac{1}{T'_{do}} \left\{ [u_f + (X_d - X'_d) I_d] I_q - P_m - \frac{1}{2} T'_{do} Q_e \omega + \frac{1}{2} T'_{do} \dot{I}_{CR} E'_q \sin \frac{\delta}{2} \right\} - \frac{1}{T'_{do}} \Delta P_e \\
&\quad + \left(\frac{1}{X_L} E'_q \dot{E}'_q \sin \delta - \frac{1}{X_L} E'^2_q \sin \frac{\delta}{2} \cdot \omega \right)
\end{aligned}$$

$$\text{令 } v_f = I_q u_f + (X_d - X'_d) I_d I_q - P_m - \frac{1}{2} T'_{do} Q_e \omega + \frac{1}{2} T'_{do} E'_q \dot{I}_{CR} \sin \frac{\delta}{2} \quad (12)$$

由 $\dot{P}_e = \Delta \dot{P}_e$, (11) 式成为

$$\Delta \dot{P}_e = \frac{1}{T'_{do}} \Delta P_e + \frac{1}{T'_{do}} v_f + \left(\frac{2}{X_L} E'_q \dot{E}'_q \cos \frac{\delta}{2} - \frac{1}{X_L} E'^2_q \omega \right) \sin \frac{\delta}{2}$$

于是在直接反馈非线性补偿控制 (12) 下, 系统模型 (1)、(2)、(3) 被补偿为:

$$\dot{\delta} = \omega \quad (13)$$

$$\dot{\omega} = -\frac{D}{M} \omega - \frac{\omega_0}{M} \Delta P_e \quad (14)$$

$$\Delta \dot{P}_e = -\frac{1}{T'_{do}} \Delta P_e + \frac{1}{T'_{do}} v_f + \left(\frac{2}{X_L} E'_q \dot{E}'_q \cos \frac{\delta}{2} - \frac{1}{X_L} E'^2_q \omega \right) \sin \frac{\delta}{2} \quad (15)$$

在模型 (13) ~ (15) 中, V_f 是新的控制变量, 由其表达式 (12) 看出, 它同静止无功发生器所提供的无功电流的变化率有关。在无功发生器的控制方式中, 当系统稳态运行时, 无功发生器将提供一个固定大小的无功电流, 以弥补系统无功的不足。因无功电流是不变的, 所以稳态时对发电机组的控制没有影响。而当系统发生故障, 在暂态过程中, 无功发生器所提供的无功电流将视情况发生变化, 此时, 除了系统提供固定的无功电流之外, 还利用其无功电流的

变化来影响机组的控制规律,使其运行尽快达到稳态(镇定)。但(15)式中的最后一项的非线性经由上述直接反馈非线性补偿无法完全消除。在此情形下,我们将对直接反馈非线性补偿系统(13)~(15),利用鲁棒反馈控制,来确保包含静止无功发生器的单机一无穷大电力系统的暂态稳定性。

4 系统的鲁棒镇定控制

在电力系统中,当线路发生故障时,线路电抗将发生变化。此时,反映到系统中的有关参数将包含不确定因素。设 $X = [X_1 \ X_2 \ X_3]^T = [\delta \ \omega \ \Delta P_e]^T$, 考虑上述各种不确定因素,以(13)~(15)作为标称系统的不确定性系统模型为:

$$\dot{X}_i(t) = [A + \Delta A]X_i + [B + \Delta B]V_f + \Delta Gg \quad (16)$$

式中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -D/M & \omega_0/M \\ 0 & 0 & -1/T'_{do} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/T'_{do} \end{bmatrix}, \quad \Delta G = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r \end{bmatrix}, \quad g = \sin \frac{\delta}{2}$$

$$\Delta A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}, \quad \Delta B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\mu \end{bmatrix}, \quad r = \frac{2}{X_L} E'_q \dot{E}'_q \cos \delta - \frac{1}{X_L} E'_s{}^2$$

令

$$\left. \begin{aligned} \Delta A &= L F E_1, \Delta B = L F E_2, \Delta G = L F E \\ L &= [0 \ 0 \ |\mu|_m]^T, F = [0 \ 0 \ \mu/|\mu|_m], E_1 = \text{diag}[1 \ 1 \ 1], E_2 = [0 \ 0 \ -1]^T \\ L &= [0 \ 0 \ |\gamma|_m]^T, F = \begin{bmatrix} \gamma \\ |\gamma|_m \end{bmatrix}, E = 1, F^T F \leq I, F^2 \leq 1 \\ &\|\gamma\| \leq \|w_1 x\|, w_1 = [1 \ 0 \ 0] \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

由(15)看出不确定量 γ 实际上是一种在输电线路上的功率流动,应是有界的。这种有界性与机组励磁系统有关。由于机组强行励磁的作用,在最严重的情形下,励磁电压将上升 5 倍,考虑(3)式,有

$$|\dot{E}'_q| \leq \left| [u_f - E_q] \frac{1}{T'_{do}} \right| \leq 4 |E_q|_{\max} \frac{1}{|T'_{do}|_{\min}}$$

由此得出:

$$|\gamma| \leq \left| E'_q \dot{E}'_q \cdot \frac{1}{X_L/2} \cos \delta \right| \leq \left| E'_q \dot{E}'_q \frac{1}{X_L/2} \right| \leq \frac{4}{|T'_{do}|_{\min}} |P_e|_{\max}$$

由上式看出, γ 的大小受系统最小时间常数和最大电磁功率的限制。因而属于 Lebesgue

可测函数集。直接反馈非线性补偿系统 (13)、(14)、(15) 具有鲁棒镇定控制^[6, 7]

$$v_f = -Kx \quad (18)$$

式中

$$K = r^2[B^T P + r^2 E_2^T E_1]$$

其中 P 是下列黎卡提 (Riccati) 方程的解

$$A^T P + PA + P \overline{B} \overline{B}^T P - r^{-2} B_p^T B_p + r^2 E_1^T E_1 + W_1^T W_1 + Q = 0 \quad (19)$$

式中

$$\begin{aligned} B_p &= B^T P_i + r^2 E_2^T E_1 \\ \overline{B} \overline{B}^T &= r^{-2} L L^T + \lambda^2 L' L'^T \end{aligned}$$

选择 $Q > 0$, $r > 0$, $\lambda > 0$, 且 $\lambda < 1$ 。

由以上分析, 我们可以对包含静止无功发生器的单机一无穷大电力系统的鲁棒镇定控制作以下叙述。经由直接反馈非线性补偿 (12), 系统动态模型化为 (13) ~ (15) 或更一般地成为包含不确定项的模型 (16)。对系统 (1) ~ (3) 的稳定控制等同于为系统 (16) 设计鲁棒镇定控制器 (17)。

5 仿真实例

考虑图 1 的系统, 用以考察前述的鲁棒镇定控制的效果。系统参数如下: $X_d = 1.75 \text{ pu}$, $X_d' = 0.24 \text{ pu}$, $X_L = 0.66 \text{ pu}$, $T_{d0}' = 7.1 \text{ s}$, $D = 5 \text{ pu}$, $M = 6.9$, $\omega_0 = 314.16 \text{ rad/s}$, $X_{ad} = 1.71 \text{ pu}$, 励磁系统输出电压限制 $-3 \leq u_f \leq 5$, 无穷大母线电压 $V_\infty = 1 \text{ pu}$, 时间常数 T_{d0}' 的扰动为 $\Delta T_{d0}' = 0.12 T_{d0}'$ 。

在以上参数下, 前述的直接反馈非线性补偿模型中

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.725 & 54.53 \\ 0 & 0 & -0.141 \end{bmatrix}, & \Delta A &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.141 \end{bmatrix}, & \Delta B &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\mu \end{bmatrix} \end{aligned}$$

选择 $|P_i| = 1.5 \text{ pu}$, 可得有关不确定性参数的约束条件

$$|\mu| \leq 0.015, T_{d0}'|_{\min} = 6.248, |\gamma| \leq 0.96$$

在黎卡提方程中, 选择 $r = 0.2$, $\lambda = 0.95$, $Q = \text{diag}\{525, 18, 2100\}$, 解出黎卡提方程, 并由

$$K = [k_1 \quad k_2 \quad k_3] = r^2[B^T P + r^2 E_2^T E_1]$$

可得系统的鲁棒镇定控制律为

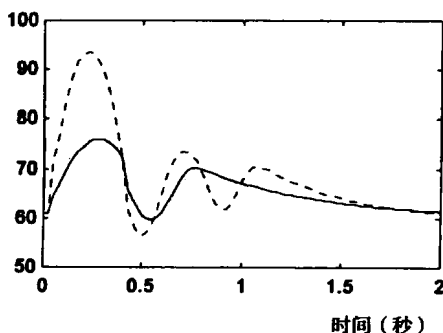
$$v_f = 42.36\delta + 15.47\omega + 5.68\Delta P_e$$

并由 (12) 得系统的励磁控制为

$$v_f = \frac{1}{I_q} [v_f - (X_d - X'_d) I_d I_q - P_m - \frac{1}{2} T'_{do} Q_e \omega + \frac{1}{2} T'_{do} E'_q i_{CR} \sin \frac{\delta}{2}]$$

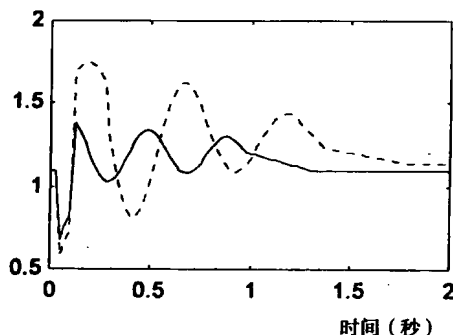
上述控制器的控制效果将由仿真结果给出,在仿真计算中,我们将考虑系统的以下运行过程,第一步,系统正常运行;第二步,在 $t_1=0.1$ 秒时,STATCOM 与线路连接点(即线路中点)发生三相对称短路故障;第三步,在 $t_2=0.2$ 秒时故障消失,系统恢复到故障前运行状态。在上述运行过程中,我们将对以下两种情形进行仿真,第一种情形为静止无功发生器只提供固定无功电流,即在直接反馈非线性补偿律中,总令 $dI_{CR}/dt=0$;第二种情形为静止无功发生器除提供固定无功电流以外,在系统暂态时,还为直接反馈非线性补偿提供附加控制 dI_{CR}/dt 。两种情形的故障前稳态运行点均为 $\delta_0=60.78^\circ$, $P_{m0}=1.1\text{pu}$, $V_0=1.0\text{pu}$ 。图 2 给出了暂态过程中发电机功角、输出电磁功率和输出电压仿真曲线。图中虚线为第一种情形,实线为第二种情形。

仿真结果显示,所给控制器在两种不同的情形下,均能使系统镇定。但与第一种情形相比较,第二种情形(即由静止无功发生器的无功电流变化率为发电机的直接反馈非线性补偿提供附加控制)能提供更快的响应速度,使机组运行达到稳态的时间更为缩短,既由 STATCOM 为系统提供了更大的阻尼。

功角 ($^\circ$)

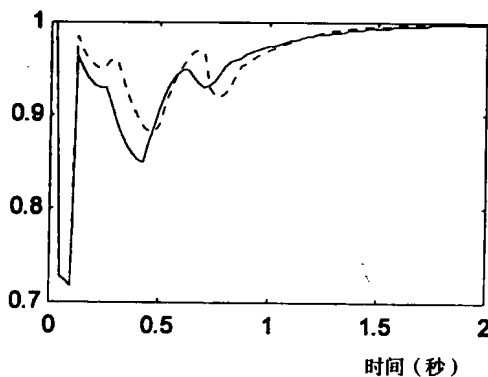
(a) 功角响应曲线

电磁功率 (V)



(b) 电磁功率响应曲线

输出电压 (V)



(c) 输出电压响应曲线

图 2 仿真结果