

基于自抗扰控制器的级联多电平 静态同步补偿器控制系统

许湘莲¹, 邹云屏¹, 郭江²

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省 武汉市 430074;

2. 武汉大学动力机械学院, 湖北省 武汉市 430072)

Control System of Cascade Multilevel Statcom Based on Auto-disturbance Rejection Controller

XU Xiang-lian¹, ZOU Yun-ping¹, GUO Jiang²

(1.College of Electrical & Electronics Engineering Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China; 2. School of Power and Machine Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China)

ABSTRACT: Cascade multilevel static synchronous compensator (STATCOM) is a so strongly coupled and nonlinear system that conventional PID control and modern control theories cannot assure a satisfactory behavior. In order to achieve high dynamic performance and robustness of control system, a new strategy for cascade multilevel STATCOM is presented by using auto-disturbance rejection controller (ADRC) in light of its principle in this paper. The ADRC controller can be designed without accurate STATCOM parameters and model. Extended states observer (ESO) in ADRC can provide the estimate of the real action of the system internal (including the unmeasured and coupled state) and external unknown disturbances, as well as compensate the action. So the active and reactive current decoupled auto-disturbance rejection control is realized. The simulation and experiment results show that the controllers ensure very good robustness and adaptability under modeling uncertainty and external disturbances, and produce good dynamic performance.

KEY WORDS: power system; static synchronous compensator; cascade multilevel inverters; auto-disturbance rejection controller; dynamic performance

摘要: 级联多电平静态同步补偿器(STATCOM)是强耦合非线性系统,采用传统PID控制和现代控制理论难以得到满意的控制效果。为了提高系统的动态性能和鲁棒性,文中根据自抗扰控制器(ADRC)的原理提出了级联多电平STATCOM的自抗扰控制方案。自抗扰控制器的设计不需要精确的STATCOM参数和数学模型,它内部的扩张状态观测器可以

估计出系统内扰(包括模型的不确定项和耦合项)和外扰的实时作用并给予补偿,从而实现无功电流和有功电流的解耦自抗扰控制。仿真和试验结果表明,自抗扰控制器对系统模型的不确定性和外扰具有较强的适应性和鲁棒性,控制系统具有优良的动态性能。

关键词: 电力系统; 静态同步补偿器; 级联多电平逆变器; 自抗扰控制器; 动态性能

0 引言

利用电力电子变流器进行无功补偿的可能性虽然早在20年前就已经为人们所认识,但限于当时电力电子器件的耐压和功率水平,无法制造出具有实用价值的装置。直到近年来高压大功率开关器件的出现,才极大的推动了STATCOM的开发和应用。STATCOM是并联型FACTS设备,它同基于可控电抗器和投切电容器的传统静止无功补偿器SVC相比,性能上具有极大的优越性,越来越得到广泛的重视,必将取代SVC成为新一代的无功电压控制设备^[1]。目前STATCOM控制系统多是基于传统PID控制,但STATCOM接入的电力系统是一个非线性系统,基于线性化的控制手段限制了装置的应用范围。现代控制理论如最优控制、自适应控制、微分几何控制和智能控制可以有效地改善STATCOM控制系统的控制性能。但最优控制是针对局部线性化模型来设计的;自适应控制算法的参数辨识较复杂,影响控制响应速度和精度;微分几何控制要求系统参数必须确切可知;智能控制则收敛速度较慢,难以满足实时性控制的要求。对于电力系统这样的强耦

基金项目: 国家自然科学基金项目(50277017)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50277017).

合、非线性系统，这些控制方法难以获得较为满意的控制效果^[2-3]。

自抗扰控制器^[4]是在继承传统PID不依赖于对象模型优点的基础上，通过改进传统PID固有缺陷而形成的新型控制器。该控制器能自动检测系统模型的实时作用并予以补偿，它不区分内扰和外扰，而是直接检测并补偿他们的总作用——对系统的总扰动。控制对象参数发生变化或遇到不确定性扰动时都能得到很好的控制效果，具有较强的适应性、鲁棒性和可操作性。并且控制器算法简单，参数适应性广^[5]。目前，自抗扰控制已被成功地应用在机器人高速高精度控制、传动装置的运动控制以及变频调速控制等诸多领域^[6-14]。

针对级联多电平STATCOM^[14-15]的控制系统设计了自抗扰控制器，并进行仿真与实验研究。结果表明，与传统PID相比，自抗扰控制有着更优的动、稳态性能，并且在系统的抗干扰和鲁棒性上有提高。

1 STATCOM 的数学模型

文中针对中高压 6kV 电力系统设计了一种基于级联多电平逆变器的 STATCOM 的拓扑结构，将级联 7 电平逆变器取代传统 STATCOM 的多重化逆变器和曲折变压器，其主电路拓扑结构如图 1 所示，级联逆变器三相采用 Y 型接法通过很小的平波电抗器 L_a 、 L_b 、 L_c 接入电网与无功负载并联。图中 $i_{sa,b,c}$ 为交流电网电流， $i_{la,b,c}$ 为负载电流， $i_{ca,b,c}$ 为从电网注入 STATCOM 电流。级联 7 电平逆变器的开关控制采用单极倍频 CPS-SPWM 技术，每相的输出

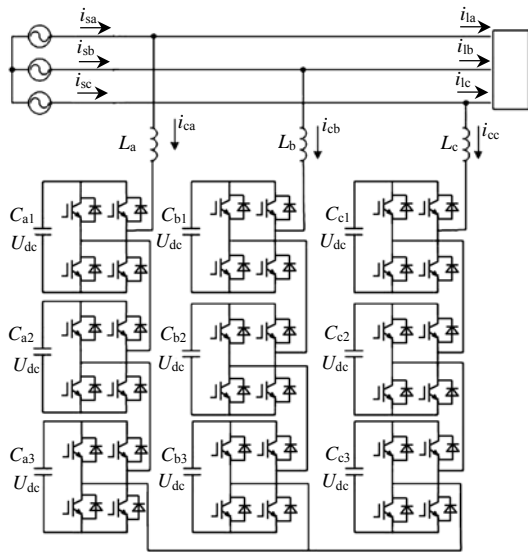


图 1 基于级联 7 电平逆变器的 STATCOM 原理图
Fig. 1 The diagram of STATCOM based on cascade 7-level inverter

电压是 7 电平的 PWM 波形，等效开关频率是实际开关频率的 $2n$ 倍 (n 是级联单元数目)，大大减小输出谐波，且能缓解开关器件耐压水平和频率间的矛盾。至于级联 7 电平 STATCOM 的工作原理及调制方法在文献^[14-15]已做介绍。

假设系统为三相平衡系统，装置的损耗用等效电阻 R 表示，STATCOM 的数学模型^[1,15]为

$$L \frac{di_c}{dt} = u_s - u_c - Ri_c \quad (1)$$

式中，从电网注入装置电流 $i_c = [i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}]^T$ ，公共接入点电压为 $u_s = \sqrt{2}U_s \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \sin(\omega t - 120^\circ) \\ \sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix}$ ，装置输出电压

为 $u_c = nMU_{dc} \begin{bmatrix} \sin(\omega t - \delta) \\ \sin(\omega t - \delta - 120^\circ) \\ \sin(\omega t - \delta + 120^\circ) \end{bmatrix}$ ， M 和 δ 为装置输出

电压幅值调制比和相角，分别将 u_s 、 u_c 、 i_c 和式(1)进行 PARK 变换，取系统电压相量 u_s 与坐标 d 轴重合，变换矩阵为

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix}$$

变换后得到 dq 坐标系下的数学模型为

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{sq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_{cd} \\ U_{cq} \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \omega L \begin{bmatrix} I_q \\ -I_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： $U_s = \begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{sq} \end{bmatrix} = T \cdot u_s = \sqrt{3} \begin{bmatrix} U_s \\ 0 \end{bmatrix}$ ；

$$U_c = \begin{bmatrix} U_{cd} \\ U_{cq} \end{bmatrix} = T \cdot u_c = \frac{\sqrt{3}}{2} nMU_{dc} \begin{bmatrix} \cos \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix}$$

$$I = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = T \cdot i_c$$

I_d 、 I_q 分别为电流的有功分量和无功分量。

从式(2)可以看出， I_d 、 I_q 相互耦合， R 、 L 难以准确测得，而且装置本身就是非线性系统，自抗扰控制则符合了这些特征，适合对 STATCOM 系统进行控制。

2 基于 ARDC 的 STATCOM 控制系统设计

自抗扰控制器是在反馈线性化的基础上设计的新型控制器，它通过非线性变换，将非线性系统转化为线性系统的积分串联型结构，从而实现了动态系统的反馈线性化^[5]。

对于如下SISO非线性不确定对象:

$$y^{(n)} = f(y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}, t) + \varpi(t) + bu \quad (3)$$

式中: $f(y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}, t)$ 为未知函数; $\varpi(t)$ 为未知外扰; y 为量测输入; u 为控制输入。

其对应的自抗扰控制器结构如图2所示。

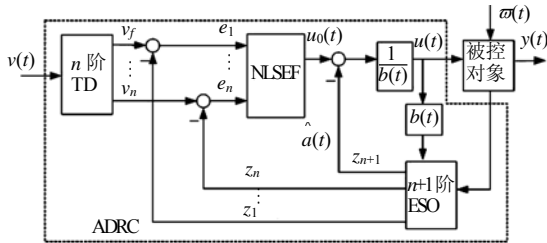


图2 自抗扰控制器结构图

Fig. 2 The diagram of ADRC controller

自抗扰控制器一般由跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)和非线性状态误差反馈控制律(NLSEF)部分组成。跟踪微分器实现对输入信号的快速无超调跟踪,并给出参考输入的各阶导数跟踪信号;扩张状态观测器则用来估计系统状态、模型和外扰的实时作用量给以“补偿”,将含有未知干扰的非线性不确定性对象化为积分串联型对象进行控制;非线性状态误差反馈控制律是利用跟踪微分器的输出和扩张状态观测器输出之间的误差来生成对扰动的补偿控制量。非线性状态误差反馈控制律用一个简单的非线性函数实现了对控制工程界的经验知识“大误差小增益,小误差大增益”的数学拟合,提高自抗扰控制器的动态性能和鲁棒性^[3-5]。

一阶自抗扰控制器的实现形式为

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = -rfal(v_1 - v(t), a_0, \delta_0) \\ \varepsilon = z_1 - y \\ \dot{\varepsilon} = z_2 - \beta_1 fal(\varepsilon, a_1, \delta_1) + bu \\ \dot{\varepsilon} = -\beta_2 fal(\varepsilon, a_1, \delta_1) \\ \varepsilon_1 = v_1 - z_1 \\ u_0 = \beta_3 fal(\varepsilon_1, a_2, \delta_2) \\ u = (u_0 - z_2) / b \end{cases} \quad (4)$$

式中 $fal(\varepsilon, a, \delta) = \begin{cases} |\varepsilon|^a \operatorname{sgn}(\varepsilon), & |\varepsilon| > \delta \\ \varepsilon / \delta^{1-a}, & |\varepsilon| \leq \delta \end{cases} \quad (5)$

可见该算法只需对象的输入输出数据 u 和 y ,简单且易于实现。

由于公共接入点电压 U_s 不便测量,将式(2)中的 U_{sd} 、 U_{sq} 视为模型的不确定项,将耦合项和不确定项之和 $\bar{\omega}_d = \omega L \cdot I_q + U_{sd}$ 和 $\bar{\omega}_q = -\omega L \cdot I_d + U_{sq}$ 视为系统的内扰,式(2)的模型简化为

$$\begin{cases} L \frac{dI_d}{dt} = -R \times I_d + \bar{\omega}_d - U_{cd} \\ L \frac{dI_q}{dt} = -R \times I_q + \bar{\omega}_q - U_{cq} \end{cases} \quad (6)$$

那么可对原本耦合的 dq 模型设计解耦的 d 、 q 轴2个电流自抗扰控制器,系统控制框图如图3。

系统的控制器设计由直流侧电压控制外环和电流控制内环构成,由于内环的响应速度远远快于外环的速度,所以可认为内环电流控制的实现时,直流电压是恒定的。

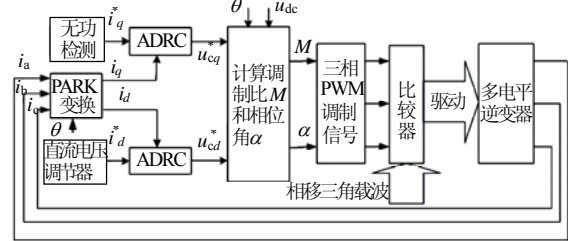


图3 系统的控制框图

Fig. 3 Control block diagram of system

由于两轴控制器的原理、参数一致,以 q 轴自抗扰控制器为例说明。由无功检测环节得到的无功电流的给定值 i_q^* 作为ADRC的参考输入,由电网注入STATCOM的无功电流 i_q (由实际检测的STATCOM三相电流经PARK变换所得)作为系统的输出量,控制量是装置的输出电压分量 U_{cq} ,控制目标是使无功电流 i_q 能跟踪其给定值 i_q^* 。

由式(6)模型的 q 轴方程可知系统是一阶系统,应设计一阶自抗扰控制器。设定一阶TD的输出为

$$\dot{v}_1 = -k_1 \cdot fal[(v_1 - i_q^*), a_1, \delta_1] \quad (7)$$

构建二阶ESO如下式所示:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_1 - k_{21} fal(\varepsilon_2, a_2, \delta_2) - U_{cq} \\ \dot{z}_2 = -k_{22} fal(\varepsilon_2, a_2, \delta_2) \end{cases} \quad (8)$$

其中 $\varepsilon_2 = z_1 - i_q$ 。通过系统状态误差反馈 $\varepsilon = z_1 - v_1$ 的非线性函数可以获得自抗扰控制律为

$$\begin{cases} u_0 = k fal(\varepsilon, a, \delta) \\ u_{cq} = (u_0 - z_2) \cdot (-1) \end{cases} \quad (9)$$

其中 k_1 、 a_1 、 δ_1 、 k_{21} 、 k_{22} 、 a_2 、 δ_2 、 k 、 a 、 δ 都是待选参数。

ADRC控制性能主要取决于参数的合理选取。参数的调整主要是依靠设计者的工程经验并利用仿真反复试选确定,其一般步骤为

(1) 选取一组参数为受控对象提供稳定控制。

(2) 根据过渡过程要求调整跟踪微分器的参数,“速度因子” k_f 越大,跟踪速度越快。

(3)调整扩张状态观测器参数使控制器尽可能快速而准确地估计参数输入和外扰的共同作用。

k_{21} 、 k_{22} 为状态误差的反馈增益，值越大，对扰动估计的滞后越小，收敛越快。一般 k_{21} 取为与控制周期的倒数处于同一数量级的值。

(4)根据控制系统性能指标在线调整非线性状态误差反馈控制律的相关参数。 k 的整定相当于比例增益的调整。

3 仿真试验分析

为了验证自抗扰控制器的控制性能，本文对所设计的系统进行了仿真和试验验证，仿真是在 Matlab/Simulink 平台进行的，试验用 380V 交流市电模拟一小型电网，各参数如表 1 所示。

表 1 仿真和试验参数

Tab. 1 The parameters of simulation and experiment

变量	仿真参数	试验参数
系统线电压 U_s/V	6000	380
频率 f/Hz	50	50
连接电感 L/mH	3	5
电感内阻 R/Ω	0.15	0.15
级联单元数目 $n/个$	3	2
开关频率 f_s/kHz	2	2
直流电容电压 U_{dc}/kV	2	170
装置容量 $S/MVar$	± 8.59	$\pm 5k$
最大补偿无功电流 I_q/A	827	7.8

为了更好的分析系统采用自抗扰控制技术后的控制性能，本文分别对采用自抗扰控制器和传统 PI 控制器的 STATCOM 控制系统进行仿真研究，给出了 2 种控制器的仿真结果，并进行了比较。着重研究了固定参数下的自抗扰控制器对模型参数变化和参考指令变化的适应能力。

图4是模型参数变化时ADRC控制器和PI控制器的动态性能。纵坐标的1对应最大补偿无功电流 i_q (为了便于调整各控制器参数，须将系统参数标么处理)。其中PI控制器的参数为：比例增益 $K_p=50$ ，积分时间常数 $K_i=20$ 。自抗扰控制器参数为： $k_1=3 \times 10^5$ 、 $a_1=0.8$ 、 $k_{21}=1 \times 10^5$ 、 $k_{22}=6.5 \times 10^4$ 、 $a_2=0.5$ 、 $k=500$ 、 $\alpha=0.75$ 、 $\delta=\delta_1=\delta_2=0.01$ 。从图可以看出，ADRC控制器的动态响应速度比PI控制快，响应时间仅半个周期0.01s，且无超调。更为突出的是，虽然电感增大了，对电流的动态响应应该是不利的，但是它的动态响应时间却没有受到影响，而PI控制器的电流响应时间随着电感的增大而增长了，由此说明当模型参数发生变化时，ADRC控制器依然保持很好的动态性能，具有较PI控制更强的鲁棒性。

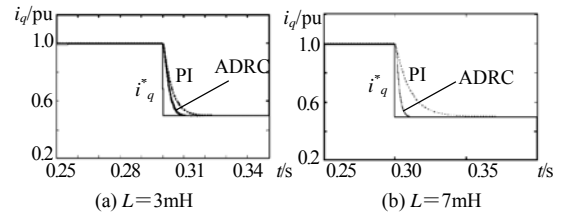


图 4 不同电感时 i_q 动态响应曲线
Fig. 4 The dynamic response of i_q with inductance changing

若模型参数不变，即 $L=3\text{ mH}$ ， $R=0.15\ \Omega$ ，改变无功电流参考指令值 i_q^* ，使自抗扰控制器的参数不变，调整PI控制器的参数，达到最优控制效果。图 5 是 i_q^* 产生不同的阶跃时，2 种控制器对应的无功电流 i_q 的阶跃响应。图 5(a)是无功电流从 1 突变到 -1 时的动态响应，即STATCOM装置从补偿最大的感性无功电流变为补偿最大的容性无功电流的情形；图 5(b)则是STATCOM装置从补偿最大的感性无功电流变为不补偿的情形。可见，不论系统无功怎么变化，自抗扰控制器的响应速度仍然快于PI控制，且响应时间几乎不受系统无功变化的影响。验证了自抗扰控制器具有较PI控制更好的自适应性。

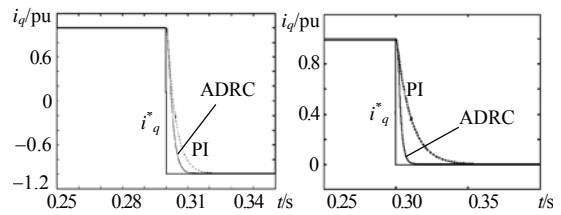


图 5 无功突变时 i_q 的动态响应曲线
Fig. 5 The dynamic response of i_q with reactive load changing

图6是STATCOM装置的电压电流波形。采用级联多电平逆变器拓扑及单极倍频CPS-SPWM调制技术后，输出电压是7电平PWM波形，谐波含量降低，不用外加滤波电路就能得到较好的电流波形。电流超前电压说明装置补偿系统的感性无功。

试验系统采用DSP和FPGA结合构成STATCOM控制系统，其中DSP完成数据和状态的采集和各算法的实现，FPGA实现多路PWM信号的生成。二者

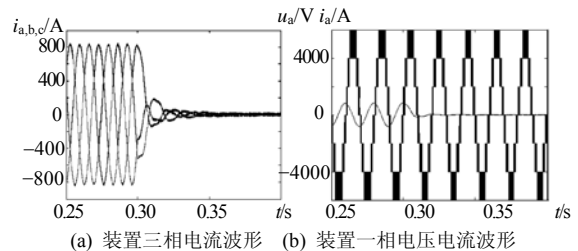
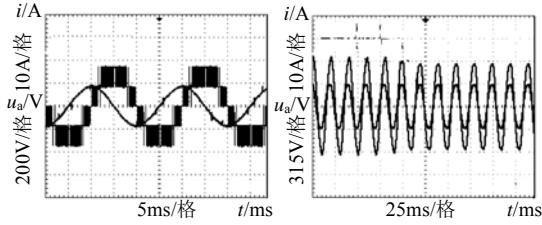


图 6 无功电流从1突变到0时STATCOM的电压电流波形
Fig. 6 The voltage and current of STATCOM with reactive current changing from 1 to 0

联合使用具有结构灵活、通用性强、效率高、适于模块化设计等优点。图7是闭环控制试验波形，由图7(b)可看出动态响应较快，补偿后由于负载所需无功功率全部由STATCOM提供，系统电流较补偿前要小，且几乎与电压同相位。



(a) STATCOM装置的电压电流 (b) 补偿前后系统电压电流

图7 闭环控制试验结果

Fig. 7 Close-loop experiment results

4 结论

为了提高级联多电平STATCOM控制系统的性能，本文根据自抗扰控制器原理设计了STATCOM的新型控制方案，并进行了仿真试验研究，结果表明，与传统PI控制相比，自抗扰控制有着更好的自适应性和鲁棒性。而且算法简单，不依赖对象的精确模型，便于工程应用。

参考文献

- [1] 姜齐荣, 谢小荣, 陈建业. 电力系统并联补偿——结构、原理、控制与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [2] 魏文辉, 刘文华, 宋强, 等. 基于逆系统方法有功—无功解耦PWM控制的链式STATCOM动态控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 23-28.
Wei Wenhui, Liu Wenhua, Song Qiang, et al. Research of fast dynamic control of static synchronous compensator using cascade multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 23-28(in Chinese).
- [3] 钟庆, 吴捷, 徐政. 自抗扰控制器在并联型有源滤波器中的应用[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(16): 22-25, 44.
Zhong Qing, Wu Jie, Xu Zheng. Application of the automatic disturbance controller in the shunt active power filter[J]. Automation of Electric Power Systems., 2002, 26(16): 22-25, 44(in Chinese).
- [4] 韩京清. 从PID技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.
Han Jingqing. From PID technique to active disturbances rejection control technique[J]. Control Engineering of China, 2002, 9(3): 13-18(in Chinese).
- [5] 夏长亮, 李正军, 杨荣, 等. 基于自抗扰控制器的无刷直流电机控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 82-86.
Xia Changliang, Li Zhengjun, Yang Rong, et al. Control system of brushless DC motor based on active-disturbance rejection controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 82-86(in Chinese).
- [6] 黄焕袍, 武利强, 韩京清, 等. 火电单元机组协调系统的自抗扰控制方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 168-173.
Huang Huanpao, Wu Liqiang, Han Jingqing, et al. A study of active disturbance rejection control on unit coordinated control system in thermal power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 168-173(in Chinese).
- [7] 余涛, 沈善德, 李东海, 等. 静止移相器和发电机励磁系统的自抗扰协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 1-5.
Yu Tao, Shen Shand, Li Dongha, et al. Coordinated auto-disturbance-rejection control of static phase shifter and excitation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 1-5(in Chinese).
- [8] 冯光, 黄立培, 朱东起. 采用自抗扰控制器的高性能异步电机调速系统[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 55-58, 120.
Feng Guang, Huang Lippei, Zhu Dongqi. High performance control of induction motor based on auto-disturbance rejection controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 55-58, 120(in Chinese).
- [9] 杨金明, 张宙, 潘剑飞. 开关磁阻式平面电动机及其控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 116-121.
Yang Jiming, Norbert C. Cheung, Pan Jianfei. The control of the switched reluctance planar machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 116-121(in Chinese).
- [10] Su Y X, Zheng C H, B. Duan Y. Automatic disturbances rejection controller for precise motion control of permanent-magnet synchronous motors[J]. IEEE Trans. Ind. Elec., 2005, 52(3): 814-823.
- [11] Feng Guang, Liu Yanfei, Huang Lippei. A new robust algorithm to improve the dynamic performance on the speed control of induction motor drive[J]. IEEE Trans. Power Electronics, 2004, 19(6): 1614-1627.
- [12] 付旺保, 赵栋利, 潘磊, 等. 基于自抗扰控制器的变速恒频风力发电并网控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 13-18.
Fu Wangbao, Zhao Dongli, Pan Lei, et al. Cutting-in control of the VSCF wind-power generator based on auto-disturbance rejection controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 13-18(in Chinese).
- [13] Jianbo Su, Wenbin Qiu, Hongyu Ma, et al. Calibration-free robotic eye-hand coordination based on an auto disturbance-rejection controller[J]. IEEE Trans. Robotics. 2004, 20(5): 899-907.
- [14] Xu Xianglian, Zou Yunping, Ding Kai, et al. Cascade multilevel inverter with phase-shift SPWM and its application in STATCOM [C]. IEEE IECON'04, Busan, Korea. TC1-3, 1139-1144.
- [15] 许湘莲, 邹云屏, 丁凯, 等. 级联多电平逆变器在STATCOM的应用研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(4): 34-39.
Xu Xianglian, Zou Yunping, Ding Kai, et al. Study of STATCOM based on cascaded multilevel Inverter with phase-shifted SPWM [J]. Engineering Journal of Wuhan University. 2005, 38(4): 34-39(in Chinese).

收稿日期: 2007-03-10.

作者简介:

许湘莲(1974—), 女, 湖南人, 博士研究生, 多电平逆变器及其在电力系统中的应用, xuxianglian@163.com;

邹云屏(1945—), 男, 湖南人, 教授, 博士生导师, 从事现代电力电子技术、信号变换与处理、功率变换器拓扑结构及电力拖动控制技术研究;

郭江(1973—), 男, 辽宁人, 副教授, 主要从事电力系统控制与状态检修方面的研究工作。

(编辑 王彦骏)