基于 LADRC 的 SHAPF 模型及其电流跟踪控制策略

周雪松,田程文,马幼捷,刘思佳,赵 健,刘 进

(天津理工大学 天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室,天津 300384)

摘要:针对一种适用于现有中高压配电系统的三相并联混合型有源电力滤波器,首先基于 PWM 原理建立了 其状态空间模型,在此基础上设计出一种基于线性自抗扰控制技术的电流跟踪控制器。该控制器能够估计出 系统所有不确定因素和外部干扰等引起的总扰动并进行补偿,实现指令电流的实时跟踪,其算法简单,易于 实现,具有一定的工程应用价值。数字仿真和物理实验结果验证了等效模型的正确性和所设计的电流跟踪 控制器的控制品质优于 PI 控制器。

关键词:并联混合型有源电力滤波器;线性自抗扰控制技术;总谐波畸变率;状态空间模型;快速性;有源电力滤波器:电流控制

中图分类号: TN 713

文献标识码:A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.04.009

0 引言

随着电力电子器件在工业中的广泛应用,电网的 谐波污染问题日趋严重。尤其是整流器、电弧炉、轧 机、电焊机等电力用户,因其特有的工作特性导致其 所在电网存在负序分量大、高次谐波多、功率因数低 等现象。因此,提高电网功率因数、补偿负序电流、 抑制谐波污染等方面的研究越来越多地受到人们的 关注^[1-6]。

采用电力电子装置就近补偿无功和吸收谐波源 产生的谐波电流,是提高功率因数和抑制谐波污染的 有效措施^[6-11]。近年来,有源电力滤波器(APF)因其 良好的谐波治理性能,越来越受到人们的关注,但受 开关器件容量及电压等级的限制,很难应用于中高 压系统^[12-15]。并联混合型有源电力滤波器(SHAPF) 兼有无源滤波器和 APF 的优点,并且可应用于中高 压系统,是目前采用较为广泛的谐波治理和无功补偿 装置^[15-18]。

在 SHAPF 的诸多实用技术中,电流跟踪控制是 一项关键技术。目前常用的控制方式有滞环控制方 式和三角波比较方式 2 种。为了消除逆变器输出电 压中的开关毛刺,需要在逆变器输出端加上低通滤波 器。如果采用滞环控制方式,则开关器件的开关频率 不固定,使得低通滤波器的设计困难,因此常采用三 角波比较方式。在广泛应用的三角波比较方式中, PID 控制算法凭借简单实用的优点长期处于主导地 位,但是面对典型的开关非线性不确定系统 SHAPF 及其对高精度电流跟踪控制的要求,显示出较大局限 性,难以满足高性能要求[19-20]。而自抗扰控制技术 ADRC(Auto Disturbance Rejection Control technique) 的核心就是将系统所有不确定因素和外部扰动视为 一个综合扰动项,然后利用扩张状态观测器(ESO) 对综合扰动项进行观测和前馈补偿,实现对系统的 高品质控制^[20-22]。但是 ADRC 的算法较为复杂,有 多个参数需要整定,而且参数和性能之间关系不够 清晰,使得参数设计较为繁琐。文献[23]总结了二 阶非线性扩张状态观测器的参数整定原则,文献[24] 应用基于搜索的计算方法来确定 ADRC 的参数,但 是对于非线性 ADRC 而言,参数的整定仍不容易。美 国克利夫兰州立大学的高志强教授对 ADRC 进行 了多年研究,指出正常运行时,ADRC 基本工作在线 性区,提出了线性自抗扰控制技术 LADRC (Linear Auto Disturbance Rejection Control technique)^[25],极 大简化了参数整定,具有很好的工程实用价值。

现针对一种适用于中高压系统的三相 SHAPF, 建立了其数学模型,并在此基础上设计出一种基于 LADRC 的电流跟踪控制器以提高系统的动态性能。 数字仿真和物理结果验证了所提数学模型和控制策 略的正确性和有效性,具有一定的工程应用价值。

1 三相 SHAPF 状态空间模型

SHAPF 与非线性负载并联接入电网,其优点是 安装、维护简单,可以直接在已有的无源滤波器上进 行改造。图1为目前常用的一种三相 SHAPF 的功 率逆变器电路,本文以此为例进行说明。该 APF 以 电压源型逆变器(VSI)作为其有源部分,以单调谐滤 波器作为其无源部分,有源部分通过耦合变压器与单 调谐滤波器形成 SHAPF。VSI 为基于自关断器件的

收稿日期:2012-04-11;修回日期:2013-02-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50877053);天津市自 然科学基金资助项目(09JCYBJC07100);天津钢管公司科技 攻关项目(KY2010-1)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50877053), the Natural Science Foundation of Tianjin (09JCYBJC07100) and Tianjin Pipe Corporation Scientific and Technological Project(KY2010-1)



图 1 三相 SHAPF 原理图 Fig.1 Schematic diagram of three-phase SHAPF

脉宽调制(PWM)逆变器,直流端为一大电容,直流 电压来自于三相桥式整流器。VSI 的输出端接有输 出滤波器,用来滤除开关器件通断造成的高频毛刺。

为了便于模型的建立和方程运算,提出以下几 点假设^[2]:VSI 看作一个理想的电压源 U_c;谐波源等 效为理想电流源 I_L;逆变器中 IGBT 为理想的开关器 件,即忽略开关器件的管压降;耦合变压器为理想变 压器。图 1 中 SHAPF 的电路结构可根据式(1)、(2) 简化为开关结构,如图 2 所示。

$$L = \frac{1}{\omega} \operatorname{Im}(Z) = \frac{1}{\omega} \operatorname{Im} \{ Z_{L0} + [Z_{C0} // (Z_{eq} / n_{T}^{2})] \}$$
(1)

 $r=\operatorname{Re}(Z)=\operatorname{Re}\{Z_{L0}+[Z_{c0}//(Z_{eq}/n_T^2)]\}$ (2) 其中, ω 为电路电流的角频率; Z_{L0} 、 Z_{c0} 为输出滤波器 滤波电感 L_0 和滤波电容 C_0 的阻抗,用于滤去 APF 发 出的高次谐波; Z_{eq} 为从变压器侧看进去的系统和单 调谐滤波器的等效阻抗; n_T 为耦合变压器的变比。

图 2 中 u^{*}_j(j=a,b,c)表示从变压器侧看进去的 三相电网电压等效折算值。依照文献[24]中的方 法,容易得到用开关函数表达的 SHAPF 的数学模 型为:

$$\begin{bmatrix} \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{a}}}{\mathrm{d}t} \\ \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{b}}}{\mathrm{d}t} \\ \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{b}}}{\mathrm{d}t} \\ \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{c}}}{\mathrm{d}t} \\ \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{c}}}{\mathrm{d}t} \\ \frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{dc}}}{\mathrm{d}t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & 0 & 0 & -\frac{1}{L} \left(s_{\mathrm{a}} - \frac{1}{3} \sum_{j=\mathrm{a,b,c}} s_{j} \right) \\ 0 & -\frac{r}{L} & 0 & -\frac{1}{L} \left(s_{\mathrm{b}} - \frac{1}{3} \sum_{j=\mathrm{a,b,c}} s_{j} \right) \\ 0 & 0 & -\frac{r}{L} & -\frac{1}{L} \left(s_{\mathrm{c}} - \frac{1}{3} \sum_{j=\mathrm{a,b,c}} s_{j} \right) \\ \frac{s_{\mathrm{a}}}{\mathrm{c}} & \frac{s_{\mathrm{b}}}{\mathrm{c}} & \frac{s_{\mathrm{c}}}{\mathrm{c}} & 0 \\ \frac{s_{\mathrm{a}}}{\mathrm{c}} & \frac{s_{\mathrm{b}}}{\mathrm{c}} & \frac{s_{\mathrm{c}}}{\mathrm{c}} & 0 \end{bmatrix} \\ & \\ \begin{bmatrix} \dot{u}_{\mathrm{a}} \\ \dot{u}_{\mathrm{b}} \\ \dot{u}_{\mathrm{c}} \end{bmatrix}^{+} \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 & b_{\mathrm{a}} w_{\mathrm{a}} \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 & b_{\mathrm{b}} w_{\mathrm{b}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} & b_{\mathrm{c}} w_{\mathrm{c}} \\ 0 & 0 & 0 & b_{\mathrm{u}} w_{\mathrm{u}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{\mathrm{a}}^{*} \\ u_{\mathrm{b}}^{*} \\ 1 \end{bmatrix}$$
(3)



图 2 三相 SHAPF 等效开关电路 Fig.2 Equivalent switch circuit of three-phase SHAPF

 $s_{j} = \begin{cases} 1 & j 桥臂上管导通, 下管断开 \\ 0 & j 桥臂下管导通, 上管断开 \end{cases}$ (4)

其中,*b_jw_j*(*j*=a,b,c,u)表示开关损耗、检测误差及外

部因素等对系统方程的干扰,*s_j(j*=a,b,c)为开关状态。 开关函数在采用对称规则采样 SPWM 控制下, 可以表示为:

$$s_{j}(t) = \begin{cases} 0 & (m-1)T_{c} \leq t \leq (2m-1-d)\frac{T_{c}}{2} \neq 0 \\ & (2m-1+d)\frac{T_{c}}{2} \leq t \leq mT_{c} \\ 1 & (2m-1-d)\frac{T_{c}}{2} < t < (2m-1+d)\frac{T_{c}}{2} \end{cases}$$
(5)

其中,*T*。为 PWM 开关周期;*d* 为占空比;*m* 为采样点,*m*=1,2,3,…。

将开关函数按傅里叶级数展开得:

$$s_{j} = d_{j} + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k} \frac{2}{k\pi} \sin(kd_{j}\pi) \cos\frac{2k\pi t}{T_{c}}$$
(6)

其中,j=a,b,c。

在高开关频率(*f*≥*f_e*,*f_e*为开关频率)下,忽略开 关函数的高频谐波成分,可以得到状态空间模型如下:

$$\begin{bmatrix} \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{a}}}{\mathrm{d}t} \\ \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{b}}}{\mathrm{d}t} \\ \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{c}}}{\mathrm{d}t} \\ \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{c}}}{\mathrm{d}t} \\ \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{c}}}{\mathrm{d}t} \\ \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{c}}}{\mathrm{d}t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & 0 & 0 & -\frac{1}{L} \left(d_{\mathrm{a}} - \frac{1}{3} \sum_{j=\mathrm{a,b,c}} d_{j} \right) \\ 0 & -\frac{r}{L} & 0 & -\frac{1}{L} \left(d_{\mathrm{b}} - \frac{1}{3} \sum_{j=\mathrm{a,b,c}} d_{j} \right) \\ 0 & 0 & -\frac{r}{L} & -\frac{1}{L} \left(d_{\mathrm{c}} - \frac{1}{3} \sum_{j=\mathrm{a,b,c}} d_{j} \right) \\ \frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{dc}}}{\mathrm{d}t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{d_{\mathrm{a}}}{C} & \frac{d_{\mathrm{b}}}{C} & \frac{d_{\mathrm{c}}}{C} & 0 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} i_{a} \\ i_{b} \\ i_{c} \\ u_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 & b_{a}w_{a} \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 & b_{b}w_{b} \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} & b_{c}w_{c} \\ 0 & 0 & 0 & b_{u}w_{u} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{a}^{*} \\ u_{b}^{*} \\ u_{c}^{*} \\ 1 \end{bmatrix}$$
(7)

2 基于 LADRC 的电流跟踪控制策略

2.1 LADRC 原理简介

ADRC 是一种解决非线性(包括线性)不确定性 系统的控制技术,具有很强的抗干扰能力。其核心就 是将系统所有不确定因素和外部扰动视为一个综合 扰动项,然后利用 ESO 对综合扰动项进行观测和前 馈补偿,实现对系统的高品质控制。自抗扰控制器由 3 个部分组成^[20-22]:跟踪微分器(TD)、ESO 和非线性 状态误差反馈(NLSEF)。这 3 个组成部分均采用非 线性函数,组成形式多样、参数众多,参数的整定是 一项繁杂的过程,在实际应用时调节复杂,不利于广 泛应用。实际上 ADRC 正常运行时,基本工作在线 性区,因此对其进行线性简化同样可以得到性能优良 的控制器,且参数少,计算简单。以 n 阶 LADRC^[25] 为例进行说明,如图 3 所示。



图 3 n 阶 LADRC 结构图 Fig.3 Structure of *n*-order LADRC

线性扩张状态观测器(LESO)为:

$$\begin{vmatrix} \dot{z}_{1} = z_{2} - \beta_{1}(z_{1} - y) \\ \dot{z}_{2} = z_{3} - \beta_{2}(z_{1} - y) \\ \vdots \\ \dot{z}_{n} = z_{n+1} - \beta_{n}(z_{1} - y) + b_{0}u \\ \dot{z}_{n+1} = -\beta_{n+1}(z_{1} - y) \end{vmatrix}$$
(8)

通过选择合适的参数 β_1 、 β_2 、…、 β_{n+1} 获得y及其 各阶微分的估计值 z_1 、 z_2 、…、 z_n ,同时很好地估计出系 统的综合扰动 z_{n+10}

线性化后 NLSEF 部分就变成 PD 控制器形式, 如下所示:

$$u_0 = k_p(v - z_1) - k_{d1} z_2 - \dots - k_{d(n-1)} z_n \tag{9}$$

选择适当的 $k_{p,k_{dl}},k_{d2},\dots,k_{d(n-1)}$ 构造控制分量 u_{0} ,进而获得 LADRC 的控制量 u 如下:

$$u = \frac{u_0 - z_{n+1}}{b_0} \tag{10}$$

式(8)—(10)构成 n 阶 LADRC 的数学模型。通 过研究发现, β_1 、 β_2 、…、 β_{n+1} 和状态观测器的带宽 ω_0 满足如下关系式:

$$s^{n+1} + \beta_1 s^n + \dots + \beta_n s + \beta_{n+1} = (s + \omega_0)^{n+1}$$
(11)

 $k_{\rm p}$ 、 $k_{\rm dl}$ 、 $k_{\rm d2}$ 、…、 $k_{\rm d(n-1)}$ 和状态反馈系统的带宽 $\omega_{\rm e}$ 满足如下关系式:

$$s^{n} + k_{d(n-1)}s^{n-1} + \dots + k_{d1}s + k_{p} = (s + \omega_{c})^{n}$$
(12)

简化的 LADRC 既继承了 ADRC 的优点,又大幅 减少了其参数,只需要调节 b_0, ω_0 以及 ω_c 3 个参数, 而且 ω_0 和 ω_c 满足 $\omega_0 = (3 \sim 5) \omega_{co}$

2.2 基于 LADRC 的电流跟踪控制系统的设计

电流跟踪控制的目的是使 SHAPF 输出的补偿 电流能够快速准确地跟踪指令电流信号的变化,是 决定 SHAPF 稳态和动态性能的一个关键因素。电流 跟踪控制方法直接决定了系统的准确性和快速性, 本文基于 LADRC 设计控制器。

在采用三角波[27]调制情况下,占空比满足式(13):

$$d_j = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_{ij}}{V_{tri}} \right) \quad j = a, b, c$$
(13)

其中, v_{ij}为 j 相谐波补偿电流瞬时值, V_{ii} 为三角载波 幅值。

将式(13)代入式(7),并整理成传递函数的形式,如式(14)所示。

$$\dot{i}_{j} = -\frac{r}{L}i_{j} + \frac{1}{L}u_{j}^{*} + b_{j}w_{j} - \frac{U_{c}}{2LV_{tri}}v_{rj} = f + b_{0}v_{rj} \qquad (14)$$

其中, $f = -\frac{r}{L}i_j + \frac{1}{L}u_j^* + b_jw_j + (b - b_0)v_{ij}$,为总扰动,此处 取 $b_0 = -\frac{U_c}{2LV_{vi}}$ 。

根据式(14)的模型,在 SHAPF 的电流跟踪控制系统中,本文拟采用 3 个一阶 LADRC 分别调节, 控制框图如图 4 所示。



图 4 电流跟踪控制框图

Fig.4 Block diagram of current tracking control

其中,一阶 LADRC 控制模型如下:

$$\begin{cases}
\dot{z}_{j_1} = z_{j_2} - \beta_1(z_{j_1} - i_j) + b_0 u \\
\dot{z}_{j_2} = -\beta_2(z_{j_1} - i_j) \\
u_0 = k_p(i_j^* - z_{j_1}) \\
u = \frac{u_0 - z_{j_2}}{b_0}
\end{cases}$$
(15)

其中, $\beta_1=2\omega_0,\beta_2=\omega_0^2,k_p=\omega_{co}$

考虑到控制对象的数学模型的形式,对 k_p 进行 修正, $k'_p = \frac{\omega_c}{-U_c/(2rV_{ri})}k_{po}$

3 仿真实验研究

为了验证 SHAPF 状态空间模型的正确性和线性 自抗扰控制器的良好品质,分别采用 LADRC 策略和传 统 PI 控制策略对三相 SHAPF 控制系统在 MATLAB 软件下进行仿真研究,给出了 2 种控制策略的仿真 结果,并进行了比较。着重研究了固定参数下的自 抗扰控制器对参考指令变化的适应能力。系统参数 的设计如下:直流侧电容 C = 20 F;直流侧电压参考 值 $U_{cref} = 1100$ V;基波电压 $U_s = 10$ kV,频率 f = 50 Hz; 系统等效参数 r = 1.273 $\Omega, L = 0.047$ H;输出滤波器 $L_0 =$ 1×10^{-5} H;耦合变压器变比 $1:n_T = 1:1;$ 无源支路 $L_1 =$ 29.77× 10^{-5} H, $C_1 = 500 \times 10^{-6}$ F, $C_2 = 166.67 \times 10^{-6}$ F。检 测环节采用基于瞬时无功功率理论的谐波电流检测 方法,直流侧电压由 PI 控制器维持。控制器参数: $\omega_c =$ 20 rad/s, $\omega_0 = 80$ rad/s, $k_p = -0.2587, b_0 = -9.4374 \times 10^{4}$ 。

图 5 为 a 相电流指令信号和 2 种不同控制策略 下的补偿电流波形,从图 5(a)、(b)波形的对比可以 看出,在 LADRC 策略下,从有源部分输出的补偿电 流能较实时、准确地跟踪检测到的补偿电流指令信 号,跟踪特性比较理想;从图 5(a)、(c)波形的对比可 以看出,在传统 PI 控制策略下,有源部分的补偿电 流跟踪不够快速,有明显的波形失真。总之,在变化 比较快的电流跟踪控制中,LADRC 策略在动态性能 和跟踪效果上明显优越于 PI 策略,适应能力更强。



Fig.5 Waveforms of command current and compensation current for phase a 图 6(a)为 a 相负载电流,其谐波畸变很明显,总 谐波畸变率(THD)为 27.76%。图 6(b)和(c)为补偿 后系统三相电流的波形和 a 相电流的谐波频谱,其 THD 仅为 2.61%,而在同样的条件下,采用传统 PI 控制策略设计的控制器的 THD 为 3.74%,可以看出 采用 LADRC 策略设计的控制器明显减小了电流波 形畸变率,对谐波电流抑制起到了很好的控制效果, 比 PI 控制更有优势,在 SHAPF 这种多变量、强耦合 系统中,已体现出其优异的控制性能。



4 实验验证

为了进一步验证所提控制算法的有效性和可行性,在一台10kV、50A的三相SHAPF样机上进行了实验验证。系统实验主电路参数与仿真参数相同,控制器部分采用基于数据交换的双TMS320F2812型DSP并行处理方式,其中一片TMS320F2812用于信号采集和数据通信等,另一片TMS320F2812用于位理控制运算。图7为负载和系统的电流实验波形,即补偿前后系统电流波形,与数字仿真结果相近。可以看出,采用LADRC策略设计的控制器使得系统电流波形得到明显改善,对谐波电流抑制起到了很好的控制效果,体现出其算法的有效性和可行性。



Fig.7 Experimental waveforms

5 结论

本文针对一种适用于中高压配电系统的三相 SHAPF,建立了其状态空间模型,在此基础上设计出 一种基于 LADRC 的电流跟踪控制器。该控制器能 够估计出系统所有不确定因素和外部干扰等引起的 总扰动并进行前馈补偿,使整个系统在工作区间内有 较好的适应性,实现指令电流的实时跟踪,补偿效果 明显优越于相同条件下的 PI 控制器。基于 LADRC 的控制算法简单,易于实现,具有良好的工程应用价 值。数字仿真和物理实验有效地验证了等效模型的 正确性和控制器的优良控制品质。

参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制与无功功率补偿[M]. 北京:机 械工业出版社,1998:1-5.
- [2] 罗安. 电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M]. 北京:中国电力出版社,2006:7-13.
- MA Youjie, LI Shengming, ZHOU Xuesong, et al. An advanced instantaneous detection method for active power filter[C]//2010
 WASE International Conference on Information Engineering (ICIE). Beidaihe, China: [s.n.], 2010: 34-37.
- [4] SENINI S, WOLFS P J. Analysis and design of a multiple-loop control system for a hybrid active filter[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2002, 49(6):1283-1292.
- [5] DETJEN D, JACOBS J, de RIK W D, et al. A new hybrid filter to dampen resonances and compensate harmonic currents in industrial power systems with power factor correction equipment [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2001, 16(6):821-827.
- [6] 师智康,罗安,刘定国,等. 静止无功补偿器与有源电力滤波器联合运行系统[J]. 中国电机工程学报,2009,29(3):56-64. SHUAI Zhikang,LUO An,LIU Dingguo, et al. Combined system of static var compensator and active power filter[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(3):56-64.
- [7] AKAGI H. New trends in active filters for power conditioning[J]. IEEE Trans on Industry Application, 1995, 32(6):1312-1322.
- [8] AKAGI H,FUJITA H,WADA K. A shunt active filter based on voltage detection for harmonic termination of a radial power distribution line[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1999, 35 (3):638-645.
- [9] 周永兵.并联有源电力滤波器(SAPF)关键技术的应用研究[D]. 天津:天津理工大学,2008.
 ZHOU Yongbing. Research on the techniques of shunt active power filter[D]. Tianjin:Tianjin University of Technology,2008.
- [10] 张定华,桂卫华,王卫安,等. 大型电弧炉无功补偿与谐波抑制的综合补偿系统[J]. 电网技术,2008,32(12):23-29.
 ZHANG Dinghua,GUI Weihua,WANG Weian,et al. Comprehensive compensation system combining reactive power compensation and harmonic suppression for large-scale electric arc-furnace [J]. Power System Technology,2008,32(12):23-29.
- [11] 汤赐. 新型注入式混合有源滤波器的理论及其应用研究[D]. 长沙:湖南大学,2009.

TANG Ci. Research on theory and application of new injection type hybrid active power filter[D]. Changsha:Hunan University,

2009.

- [12] 刘昊. 非正交坐标系 SVPWM 理论分析与混合型 APF 应用研究
 [D]. 北京:华北电力大学,2005.
 LIU Hao. Analysis of SVPWM in the context of nonorthogonal coordinates and study on the hybrid active power filter [D].
- [13] PENG F Z,AKAGI H,NABASE A. A new approach to harmonic compensation in power systems –a combined system of shunt passive and series active filters [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1990, 26(6):983-990.

Beijing: North China Electric Power University, 2005.

- [14] FUJITA H,AKAGI H. A practical approach to harmonic compensation in power system-series connection of passive and active filters [C] // Industry Applications Society Annual Meeting. Washington, USA; IEEE, 1990; 1107-1112.
- [15] 周柯. 注入式有源电力滤波器的关键技术研究与工程应用[D]. 长沙:湖南大学,2007.
 ZHOU Ke. The key technologies research and engineering application of injection type active power filter[D]. Changsha: Hunan University,2007.
- [16] 马玥. 混合型有源电力滤波器的研究[D]. 保定:华北电力大学, 2008.

MA Yue. Research on hybrid active power filter[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2008.

[17] 吴卫民. 新型谐波抑制及相关技术的研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.

WU Weimin. Novel harmonic suppression methods and relative techniques[D]. Hangzhou;Zhejiang University,2005.

- [18] 唐健. 三相四线制三电平三桥臂 APF 关键技术及其控制研究
 [D]. 武汉:华中科技大学,2010.
 TANG Jian. Research on the key issues and control for the three-phase four-wire tri-level three-leg APF[D]. Wuhan:Huazhong University of Science & Technology,2010.
- [19] 刘宏超. 三相四开关并联型有源电力滤波器的理论与应用研究
 [D]. 长沙:湖南大学,2009.
 LIU Hongchao. The theory of three-phase four-switch shunt active power filter and its application[D]. Changsha:Hunan University,2009.
- [20] 管志敏. 自抗扰控制技术在大型火电机组控制系统中的应用研究[D]. 北京:华北电力大学,2010.

GUAN Zhimin. Research on the large thermal power control systems based on ADRC[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2010.

- [21] 王晓雷,吴必瑞,毋炳鑫. 特高压磁阀式可控电抗器自抗扰 DSP 控制系统[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(14):46-50,54.
 WANG Xiaolei,WU Birui,WU Bingxin. Application of UHV magnetic-valve controllable reactor based on auto-disturbance rejection floating point DSP[J]. Power System Protection and Control,2009,37(14):46-50,54.
- [22] 肖洪昌,童家鹏,余涛. 微型燃气轮发电机系统的自抗扰控制方 法研究[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(13):7-12,31.
 XIAO Hongchang,TONG Jiapeng,YU Tao. Auto disturbance rejection control of microturbine system[J]. Power System Protection and Control,2009,37(13):7-12,31.
- [23] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,2008: 237-279.
- [24] 程代展. 应用非线性控制[M]. 北京:机械工业出版社,2006: 138-185.

- [25] GAO Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference. Colorado, USA: [s.n.], 2003:4989-4996.
- [26] 夏向阳,罗安,商红忠.并联混合型有源电力滤波器的建模[J]. 高电压技术,2007,33(9):146-149.

XIA Xiangyang,LUO An,SHANG Hongzhong. Modeling of parallel hybrid active power filter[J]. High Voltage Engineering, 2007,33(9):146-149.

[27] 叶小军,曾江,王克英,等. 并联有源电力滤波器双滞环电流控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(9):60-64.
 YE Xiaojun,ZENG Jiang,WANG Keying, et al. Double hysteresis current control strategy for shunt active power filter[J]. Power

System Protection and Control, 2009, 37(9):60-64.

作者简介:

周雪松(1964-),男,江西南昌人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用、电力系统自动化等:

田程文(1984-),男,山西朔州人,硕士研究生,研究方向 为电力电子技术在电力系统中的应用、电力系统继电保护 (E-mail:chengwentian0602@163.com);

马幼捷(1964-), 女, 天津人, 教授, 博士, 研究方向为电 力系统的分析与控制、风力发电技术等。

SHAPF model based on LADRC and its current tracking control

ZHOU Xuesong, TIAN Chengwen, MA Youjie, LIU Sijia, ZHAO Jian, LIU Jin

(Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated Systems,

Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: A state-space model is established based on PWM(Pulse Width Modulation) theory for the threephase SHAPF(Shunt Hybrid Active Power Filter) used in middle- and high-voltage distribution systems and a current tracking controller based on LADRC(Linear Auto Disturbance Rejection Control technique) is designed for it, which estimates and compensates the general disturbance caused by all unknown internal dynamics and external disturbances to achieve the real-time tracking of command current. Its control algorithm is simple and easy to implement in practical projects. Simulative and experimental results validate the correctness of the established model and the control performance of the designed controller superior to PI controller.

Key words: shunt hybrid active power filter; linear auto disturbance rejection control technique; total harmonic distortion; state-space model; rapidity; active filters; current control

(上接第 34 页 continued from page 34)

Analysis of peak-load regulation capability based on combined dispatch of wind power and thermal power

LONG Hongyu¹, XU Ruilin², HE Guojun², ZHAO Yuan³, XIE Kaigui³, ZHANG Xu³

(1. Postdoctoral Workstation of Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 401123, China;

2. Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China;

3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and

New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: A method of wind-thermal power combined dispatch is presented, which regards the cogenerations and the centralized water-source heat pumps as the joint heat-source and carries out the coordinated control of joint heat-source and wind power to smooth the fluctuation of wind power output. It takes the minimized fluctuation of wind power output as its object and converts the transmission distance between heat source and heating end-user into the feeding time, which is then used as the key parameter of the combined dispatch. The insufficiency of daily peak-load regulation is calculated to reflect the impact of randomicity of grid-connected wind power output on the peak-load regulation capability of grid, which verifies the effectiveness of the combined dispatch method in reducing wind power fluctuation and increasing gridconnected wind power capacity.

Key words: wind power; grid connection; wind-thermal power combined dispatch; cogenerations; watersource heat pump; peak-load regulation

64