

NPC 型三电平三相四线制 SAPF 非线性无源控制策略

程启明¹, 孙伟莎¹, 程尹曼², 张宇¹, 谭冯忍¹, 高杰¹

(1. 上海电力大学 自动化工程学院 上海市电站自动化技术重点实验室, 上海 200090;

2. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要:针对线性控制器依赖局部线性化方法的缺点,提出并联型有源滤波器(SAPF)非线性无源控制策略。根据被控对象二极管钳位(NPC)型三电平三相四线制 SAPF 在 $dq0$ 坐标系下的欧拉(EL)数学模型分析其无源性;从能量角度出发构造能量存储函数,得到能使被控量收敛至期望值的无源控制规律;以使内环电流解耦为目的,采用阻尼注入法对其简化,提高系统的动态性能;对所设计的 NPC 型三电平 SAPF 的非线性无源控制方法进行了仿真及硬件实验。结果表明,所设计的基于非线性无源控制策略的 NPC 型三电平 SAPF 能够实现电网平衡/不平衡情况下的电流低谐波、直流侧电压稳定及中点电压平衡;与传统的三环 PI 控制策略相比,具有较好的补偿效果。

关键词:三相四线制系统;并联型有源滤波器;无源控制;欧拉模型;中点电压平衡控制;电网不平衡

中图分类号: TN 713

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.017

0 引言

随着电力电子技术的迅速发展,电网中各种电力电子装置日益增多^[1],使得电网的电能质量不断下降。传统的无源滤波器虽结构简单、运行维护方便,但只能消除特定次谐波,并且易与电网产生谐振^[2]。并联型有源滤波器(SAPF)补偿特性灵活,可动态补偿任意次谐波^[3],有效地克服了无源滤波器的缺陷,因而成为了近年来的研究热点。

三相三线制 SAPF 发展较为成熟,但其忽略了对零序分量的处理,三相四线制 SAPF 克服了这一缺点,不仅能够对三相平衡系统的谐波和无功进行补偿,而且能够对电网不平衡时非线性负荷产生的零序谐波分量进行补偿^[4]。但传统的两电平 SAPF 由于其自身拓扑结构的限制,很难用于高压大容量场所^[5]。与两电平 SAPF 相比,三电平 SAPF 开关器件承受的电压更低、损耗更小、波形更接近于正弦波,因而得到了越来越广泛的应用。目前,三电平 SAPF 的拓扑结构主要有二极管钳位(NPC)型、飞跨电容型和级联 H 桥型^[6]。其中 NPC 型所需的直流侧电容数量和所需解决的直流侧电压不平衡问题最少、鲁棒性最好^[7],因此本文选择其作为研究对象。

当拓扑结构一定时,SAPF 的性能主要取决于控制策略。工业控制中最常用的方法是采用 PI 控制

策略,但 SAPF 的指令电流是多种频率正弦量的叠加信号,采用传统的 PI 控制必然会产生稳态误差和相位偏移^[8]。近 20 年来,非线性控制理论的发展为 SAPF 系统的建模和解耦提供了依据。文献[9]提出将滑模控制运用于 SAPF,该方法虽取得了较好的补偿效果,但其存在高频抖动的问题;文献[10]利用输入输出反馈线性化方法建立模型,能实现对 SAPF 三相进行解耦控制,但该方法需建立精确的系统模型;文献[11]提出将无源性理论运用到混合型 SAPF 中,但其控制对象为传统的两电平 SAPF 且只能实现电网平衡条件下的控制。

为此,本文提出了针对 NPC 型三电平三相四线制 SAPF 的新型控制方法——非线性无源控制。该方法从能量角度出发,在确保系统严格无源的前提下,设计电流内环采用基于欧拉(EL)模型的无源控制,实现系统对谐波电流快速高效的跟踪控制;电压外环采用 PI 控制,保证直流侧电压的稳定,实现非线性负载突变时的动态调节。针对中点平衡控制问题,本文采用基于电荷平衡原理的控制方法,通过调节因子 f 的变化实现对中点电位的实时控制。仿真和实验结果均能证明本文提出的非线性无源控制用于电网平衡/不平衡下 NPC 型三电平 SAPF 的有效性和可行性。

1 NPC 型三电平三相四线制 SAPF 的 EL 模型分析

1.1 NPC 型三电平三相四线制 SAPF 一般数学模型

NPC 型三电平三相四线制 SAPF 的简化主电路结构如图 1 所示。图中将 SAPF 的每一相桥臂均等效成一个单刀三掷开关。为了建立其数学模型,假设:半导体开关器件是理想开关;三相的滤波电感 L_f 、滤波电阻 R_f 是对称的;直流侧 2 个电容 C_1 、 C_2 值

收稿日期:2017-09-20;修回日期:2018-09-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61573239);上海市重点科技攻关计划项目(14110500700);上海市电站自动化技术重点实验室项目(13DZ2273800)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61573239), the Key Science and Technology Plan of Shanghai Science and Technology Commission(14110500700) and Shanghai Key Laboratory Power Station Automation Technology Laboratory(13DZ2273800)

相等,即 $C_1 = C_2 = C_d$ 。

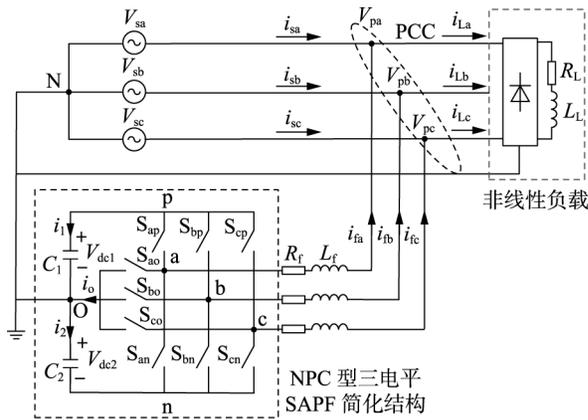


图 1 NPC 型三电平三相四线制 SAPF 的简化主电路结构

Fig.1 Simplified main circuit structure of NPC-type three-level three-phase four-wire SAPF

图 1 中, V_{si} ($i=a, b, c$) 为三相电源的相电压; V_{pi} 为公共连接点 (PCC) 处的电压; V_{dc1} 、 V_{dc2} 和 i_1 、 i_2 分别为 C_1 、 C_2 两端电压和电流; i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 分别为三相电源电流、负载电流和 SAPF 补偿电流; R_L 、 L_L 分别为三相整流桥后串联阻感性负载 (即非线性负载) 的电阻、电感。 S_{ij} ($i=a, b, c; j=p, n, o$, 其中 p、n、o 分别表示上桥臂连接点、下桥臂连接点、中间点) 为三电平 SAPF 的开关函数, 其定义如式 (1) 所示。

$$S_{ij} = \begin{cases} 1 & S_{ij} \text{ 导通} \\ 0 & S_{ij} \text{ 关断} \end{cases} \quad (1)$$

且 S_{ij} 满足约束条件:

$$S_{ip} + S_{in} + S_{io} = 1 \quad (2)$$

当 $S_{ip} = 1$ 时, SAPF 第 i 相的上桥臂 2 个开关导通, 其余开关关断, 此时 SAPF 的第 i 相输出的相电压为 V_{dc1} ; 当 $S_{in} = 1$ 时, SAPF 第 i 相下桥臂 2 个开关导通, 其余开关关断, 此时 SAPF 的第 i 相输出的相电压为 $-V_{dc2}$; 当 $S_{io} = 1$ 时, SAPF 第 i 相中间的 2 个开关导通, 其余开关关断, 此时 SAPF 的第 i 相输出的相电压为 0^[12]。

由图 1 并根据基尔霍夫 (Kirchhoff) 定律和状态空间平均法可得 NPC 型三电平三相四线制 SAPF 在 $dq0$ 坐标系下的数学模型为:

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{td}}{dt} + R_f i_{td} - \omega L_f i_{tq} = \frac{S_{dp} - S_{dn}}{2} V + \frac{S_{dp} + S_{dn}}{2} \Delta V - V_{pd} \\ L_f \frac{di_{tq}}{dt} + R_f i_{tq} + \omega L_f i_{td} = \frac{S_{qp} - S_{qn}}{2} V + \frac{S_{qp} + S_{qn}}{2} \Delta V - V_{pq} \\ L_f \frac{di_{t0}}{dt} + R_f i_{t0} = \frac{S_{op} - S_{on}}{2} V + \frac{S_{op} + S_{on}}{2} \Delta V - V_{p0} \\ \frac{C_d}{2} \frac{dV}{dt} = - \left(\frac{S_{dp} - S_{dn}}{2} i_{td} + \frac{S_{qp} - S_{qn}}{2} i_{tq} + \frac{S_{op} - S_{on}}{2} i_{t0} \right) \\ \frac{C_d}{2} \frac{d\Delta V}{dt} = - \left(\frac{S_{dp} + S_{dn}}{2} i_{td} + \frac{S_{qp} + S_{qn}}{2} i_{tq} + \frac{S_{op} + S_{on}}{2} i_{t0} \right) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $V = V_{dc1} + V_{dc2}$; $\Delta V = V_{dc1} - V_{dc2}$; i_{td} 、 i_{tq} 、 i_{t0} 分别为补偿电流在 d 、 q 、 0 轴上的分量; V_{pd} 、 V_{pq} 、 V_{p0} 分别为 PCC 处的电压在 d 、 q 、 0 轴上的分量; S_{dp} 、 S_{qp} 、 S_{op} 为在 $dq0$ 坐标系下的上桥臂连接点开关函数; S_{dn} 、 S_{qn} 、 S_{on} 为在 $dq0$ 坐标系下的下桥臂连接点开关函数; $\omega = 2\pi f_s$ 为电源角频率, $f_s = 50$ Hz 为电网频率。

1.2 NPC 型三电平 SAPF 的 EL 数学模型

选取系统的状态变量为:

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T = [i_{td}, i_{tq}, i_{t0}, V, \Delta V]^T \quad (4)$$

将式 (3) 改写成满足无源控制要求的 EL 模型为^[13]:

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{J}\mathbf{x} + \mathbf{R}\mathbf{x} = \mathbf{u} \quad (5)$$

$$\mathbf{M} = \text{diag}(L_f, L_f, L_f, C_d/2, C_d/2)$$

$$\mathbf{R} = \text{diag}(R_f, R_f, R_f, 0, 0), \quad \mathbf{u} = [-V_{pd}, -V_{pq}, -V_{p0}, 0, 0]^T$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_f & 0 & \frac{S_{dp} - S_{dn}}{2} & \frac{S_{dp} + S_{dn}}{2} \\ \omega L_f & 0 & 0 & \frac{S_{qp} - S_{qn}}{2} & \frac{S_{qp} + S_{qn}}{2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{S_{op} - S_{on}}{2} & \frac{S_{op} + S_{on}}{2} \\ \frac{S_{dp} - S_{dn}}{2} & \frac{S_{qp} - S_{qn}}{2} & \frac{S_{op} - S_{on}}{2} & 0 & 0 \\ \frac{S_{dp} + S_{dn}}{2} & \frac{S_{qp} + S_{qn}}{2} & \frac{S_{op} + S_{on}}{2} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

其中, \mathbf{M} 为由储能元件构成的正定对角阵; \mathbf{R} 为半正定对角矩阵, 反映了系统的耗散特性; \mathbf{u} 为输入矩阵, 反映了系统与外部的能量交换; \mathbf{J} 为反对称矩阵, 即 $\mathbf{J} = -\mathbf{J}^T$, 反映了系统内部的互联结构。

2 NPC 型三电平三相四线制 SAPF 非线性无源控制策略

2.1 NPC 型三电平三相四线制 SAPF 严格无源性分析

对于图 1 所示的 NPC 型三电平 SAPF 系统, 其存储的磁场能和电场能之和为:

$$H(\mathbf{x}) = L_f(i_{td}^2 + i_{tq}^2 + i_{t0}^2)/2 + C_d(V^2 + \Delta V^2)/4 \quad (6)$$

结合式 (4)、(5) 可将式 (6) 写为:

$$\dot{H}(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{M}\dot{\mathbf{x}}/2 \quad (7)$$

故可以选择式 (7) 作为系统的能量存储函数。根据严格无源的定义, 只要证明 $H(\mathbf{x})$ 对时间的导数对输入为 \mathbf{u} 、输出为 \mathbf{y} 及能量供给率为 $\mathbf{u}^T \mathbf{y}$ 的系统满足式 (8), 即可证明该系统是严格无源的^[14]。

$$\dot{H}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{u}^T \mathbf{y} - Q(\mathbf{x}) \quad (8)$$

其中, $Q(\mathbf{x})$ 为正定函数。

结合式 (5)、(7) 可得:

$$\dot{H}(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{x}^T (\mathbf{u} - \mathbf{J}\mathbf{x} - \mathbf{R}\mathbf{x}) = \mathbf{u}^T \mathbf{x} - \mathbf{x}^T \mathbf{R}\mathbf{x} \quad (9)$$

只要令 $\mathbf{x} = \mathbf{y}$ 和 $\mathbf{x}^T \mathbf{R}\mathbf{x} = Q(\mathbf{x})$, 则满足式(8), 即证明了 NPC 型三电平 SAPF 系统是严格无源的。根据无源控制的理论, 严格无源的系统一定可以采用无源控制且控制系统是稳定的^[15]。

2.2 内环电流的无源控制

为实现网侧功率因数单位化、电源电流正弦化、直流侧电容电压达到期望值以及均压控制, 取系统的期望平衡点为:

$$\mathbf{x}^* = [x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*, x_5^*]^T = [i_{Ldh} + \Delta i_d, i_{Lqh}, i_{Loh}, V^*, 0]^T \quad (10)$$

其中, i_{Ldh} 、 i_{Lqh} 和 i_{Loh} 分别为负载电流的谐波分量在 d 、 q 、 0 轴上的分量。

采用无源控制的目的是使各被控量达到期望值。为此, 令误差变量 $\mathbf{x}_e = \mathbf{x} - \mathbf{x}^*$, 由式(5)可得:

$$\mathbf{M} \dot{\mathbf{x}}_e + \mathbf{J}\mathbf{x}_e + \mathbf{R}\mathbf{x}_e = \mathbf{u} - (\mathbf{M} \dot{\mathbf{x}}^* + \mathbf{J}\mathbf{x}^* + \mathbf{R}\mathbf{x}^*) \quad (11)$$

取误差能量存储函数为:

$$H(\mathbf{x}_e) = \mathbf{x}_e^T \mathbf{M}\mathbf{x}_e / 2 \quad (12)$$

只要使 $H(\mathbf{x}_e)$ 收敛到 0, 则 \mathbf{x}_e 也能收敛到 0, 即可达到无源控制的目的。

为了使系统快速收敛到期望值, 使误差能量存储函数快速变为 0, 可采用阻尼注入法来加快系统的能量耗散^[16], 从而加快系统的响应速度。注入阻尼耗散项为:

$$\mathbf{R}_d \mathbf{x}_e = (\mathbf{R} + \mathbf{R}_a) \mathbf{x}_e \quad (13)$$

其中, $\mathbf{R}_a = \text{diag}(r_{a1}, r_{a2}, r_{a3}, 0, 0)$ 为与矩阵 \mathbf{R} 形式相似的半正定对角阵, r_{a1} 、 r_{a2} 、 r_{a3} 为 3 个正常数。结合式(13)可将式(11)改写为:

$$\mathbf{M} \dot{\mathbf{x}}_e + \mathbf{J}\mathbf{x}_e + \mathbf{R}_d \mathbf{x}_e = \mathbf{u} - (\mathbf{M} \dot{\mathbf{x}}^* + \mathbf{J}\mathbf{x}^* + \mathbf{R}\mathbf{x}^* - \mathbf{R}_a \mathbf{x}_e) \quad (14)$$

为了确保系统的严格无源性, 选取控制规律为:

$$\mathbf{u} = \mathbf{M} \dot{\mathbf{x}}^* + \mathbf{J}\mathbf{x}^* + \mathbf{R}\mathbf{x}^* - \mathbf{R}_a \mathbf{x}_e \quad (15)$$

此时, 有:

$$\dot{H}(\mathbf{x}_e) = \mathbf{x}_e^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{x}}_e = -\mathbf{x}_e^T (\mathbf{R}_d + \mathbf{J}) \mathbf{x}_e < 0 \quad (16)$$

结合式(5)、(10)求解式(15), 可得开关函数在 $dq0$ 坐标系下的关系为:

$$\begin{cases} \frac{S_{dp} - S_{dn}}{2} = \frac{V_{pd} - \omega L_f x_2^* + R_f x_1^* - r_{a1}(x_1 - x_1^*)}{x_4^*} \\ \frac{S_{qp} - S_{qn}}{2} = \frac{V_{pq} + \omega L_f x_1^* + R_f x_2^* - r_{a2}(x_2 - x_2^*)}{x_4^*} \\ \frac{S_{0p} - S_{0n}}{2} = \frac{V_{p0} + R_f x_3^* - r_{a3}(x_3 - x_3^*)}{x_4^*} \end{cases} \quad (17)$$

将式(17)代入式(3)可得:

$$\begin{cases} L_f x_4^* \frac{dx_1}{dt} = V_{pd}(x_4 - x_4^*) - \omega L_f(x_2^* x_4 - x_2 x_4^*) + R_f(x_1^* x_4 - x_1 x_4^*) - r_{a1}(x_1 - x_1^*) x_4 \\ L_f x_4^* \frac{dx_2}{dt} = V_{pq}(x_4 - x_4^*) - \omega L_f(x_1^* x_4 - x_1 x_4^*) + R_f(x_2^* x_4 - x_2 x_4^*) - r_{a2}(x_2 - x_2^*) x_4 \\ L_f x_4^* \frac{dx_3}{dt} = V_{p0}(x_4 - x_4^*) + R_f(x_3^* x_4 - x_3 x_4^*) - r_{a3}(x_3 - x_3^*) x_4 \end{cases} \quad (18)$$

由式(18)可知, 尽管阻尼注入法和控制规律(式(15))可实现动态过程中 $H(\mathbf{x}_e)$ 的加速收敛, 但存在很强的耦合, 即 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 会相互影响。为了解决这一问题, 利用“无功功率”简化该系统^[17], 将式(14)变形为:

$$\mathbf{M} \dot{\mathbf{x}}_e + \mathbf{R}_d \mathbf{x}_e = \mathbf{u} - (\mathbf{M} \dot{\mathbf{x}}^* + \mathbf{J}\mathbf{x}^* + \mathbf{R}\mathbf{x}^* - \mathbf{R}_a \mathbf{x}_e) \quad (19)$$

为了确保系统的严格无源性, 选取新的控制规律为:

$$\mathbf{u} = \mathbf{M} \dot{\mathbf{x}}^* + \mathbf{J}\mathbf{x}^* + \mathbf{R}\mathbf{x}^* - \mathbf{R}_a \mathbf{x}_e \quad (20)$$

此时, 有:

$$\dot{H}(\mathbf{x}_e) = \mathbf{x}_e^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{x}}_e = -\mathbf{x}_e^T \mathbf{R}_d \mathbf{x}_e < 0 \quad (21)$$

同时由于外环电压响应速度远远大于内环, 因此可假设 $x_5 = 0$ ^[18]。再结合式(4)、(5)、(10)求解式(20), 可得新的开关函数在 $dq0$ 坐标系下的关系为:

$$\begin{cases} \frac{S_{dp} - S_{dn}}{2} = \frac{V_{pd} - \omega L_f x_2 + R_f x_1^* - r_{a1}(x_1 - x_1^*)}{x_4} \\ \frac{S_{qp} - S_{qn}}{2} = \frac{V_{pq} + \omega L_f x_1 + R_f x_2^* - r_{a2}(x_2 - x_2^*)}{x_4} \\ \frac{S_{0p} - S_{0n}}{2} = \frac{V_{p0} + R_f x_3^* - r_{a3}(x_3 - x_3^*)}{x_4} \end{cases} \quad (22)$$

再将式(22)代入式(3)可得:

$$\begin{cases} x_1^* = x_1 + \frac{L_f}{R_f + r_{a1}} \frac{dx_1}{dt} \\ x_2^* = x_2 + \frac{L_f}{R_f + r_{a2}} \frac{dx_2}{dt} \\ x_3^* = x_3 + \frac{L_f}{R_f + r_{a3}} \frac{dx_3}{dt} \end{cases} \quad (23)$$

由式(23)可知, 式(20)所示的电流环的无源控制规律可使被控量 x_1 、 x_2 和 x_3 互不影响。同时可以看出, 通过选择适当的注入阻尼 r_{a1} 、 r_{a2} 和 r_{a3} , 可使 x_1 、 x_2 和 x_3 快速收敛到期望值 x_1^* 、 x_2^* 和 x_3^* 。

2.3 中点电压平衡控制

NPC 型三电平 SAPF 拓扑结构虽具有许多突出的优点, 但中点电压不平衡也是其固有的缺陷。中

点电压波动会降低系统的稳定性,严重时甚至会系统无法正常工作,因此必须对其进行控制。通过调节空间矢量脉宽调制(SVPWM)算法中的正负小矢量的作用时间即可实现中点电压平衡控制^[19]。本文采用基于电荷平衡原理的控制方法,通过调节因子 f 的变化实现对中点电位的实时控制。

通过分析可知,电容 C_1 、 C_2 的电荷分别为 $Q_1 = C_1 V_{dc1}$ 、 $Q_2 = C_2 V_{dc2}$ 。在一个采样周期 T_s 中,假设 SAPF 的三相输出电流 i_f 为恒量,则电容电荷的变化量为:

$$\Delta Q_1 = -i_f T_s (1+f)/2, \Delta Q_2 = -i_f T_s (1-f)/2 \quad (24)$$

电容电荷的平衡条件为:

$$Q_1 + \Delta Q_1 = Q_2 + \Delta Q_2 \quad (25)$$

由式(24)、(25)可得:

$$f = -\frac{C_d \Delta V}{i_f T_s} \quad (26)$$

图 2 为 NPC 型三电平三相四线制 SAPF 非线性无源控制结构框图。由图 2 可见,控制器采用电压外环和电流内环的双环结构,其中电压外环采用 PI 控制,将 V 与其期望值 V^* 进行比较之后经 PI 控制器产生 Δi_d 、 Δi_q 与 d 轴的谐波指令 i_{Ldh} 相加之后作为 SAPF 输出电流 d 轴分量的参考值 x_1^* ;电流内环采用基于 EL 模型的无源控制,保证系统的稳态补偿精度和动态性能。将内环电流的输出量——开关信号与 V 进行运算后所得的三相电压作为 SVPWM 的输入,控制 SAPF 的开关动作。图中调节因子 f 与 ΔV 有关,采用 $dq0$ 谐波检测法提取谐波电流指令^[20]。

3 仿真分析

为了验证本文提出的非线性无源控制的可行性和优越性,利用 Simulink 仿真软件对电网平衡/不平衡时 NPC 型三电平三相四线制 SAPF 系统进行仿真研究,并在电源电压平衡且系统参数变化时,将本文提出的非线性无源控制策略与 PI 控制策略进行仿真比较。系统的仿真参数见附录中表 A1。

3.1 电网电压平衡时控制性能分析

仿真开始时,负载参数如附录中表 A1 所示;在 $t=0.3$ s时,接入另一相同参数的负载。这一加载过程会使谐波电流成倍变化,可以考察系统的动态跟踪能力。将本文所提的非线性无源控制策略与 PI 控制的效果进行比较,其仿真结果如图 3 所示。

由图 3 可见,初始时刻,本文所提控制方法下系统稳定运行,能有效地补偿非线性负载产生的谐波电流,且能使 V 稳定在设定值 V^* , ΔV 维持在 $-5 \sim 5$ V 之间; $t=0.3$ s时,负载电流突增, V 减小,但经短暂动态过程后,系统能快速跟踪至平衡点,恢复平稳运行,有效克服了系统参数变化时产生的不利影响。与传统的 PI 控制相比,本文所提控制方法下直流侧总电压达到稳定值的时间约为 0.05 s,远小于传统的 PI 控制下的 0.12 s,且当负载突变时直流侧电压的超调量更小,这也进一步证明了本文所提控制策略的有效性、快速性和强鲁棒性。并且补偿前 a 相电网电流的谐波总畸变率(THD)值为 23.59%,采用传统 PI 控制后 THD 值下降至 6.33%,而采用本文所提的控制策略后 THD 值下降至 3.26%,谐波含量更低,电流跟踪精度更高。

3.2 电网电压幅值不平衡时控制性能分析

设置 a、b、c 三相电源电压的有效值分别为 220 V、150 V、192 V,此时电网电压的幅值不平衡,其他参数如附录中表 A1 所示。仿真结果如图 4 所示。

由图 4 可见,经本文控制方法下的 SAPF 补偿后,各相电源电流近似为正弦波,并且 THD 大幅降低,a、b、c 三相的 THD 值分别由 18.14%、26.68%、23.45%下降至 3.52%、3.89%、3.49%;上、下直流侧电容电压能维持在设定值 400 V 左右,SAPF 侧输出相电压为三电平;与传统的 PI 控制相比,采用本文提出的控制方法时各相电源电流的谐波含量更小,而上、下直流侧电容电压波动也更小。

3.3 电网电压相角不平衡时控制性能分析

设置三相电源电压的有效值均为 220 V,a、b、c 三相电源电压的相角分别为 0° 、 -90° 、 60° ,此时电网

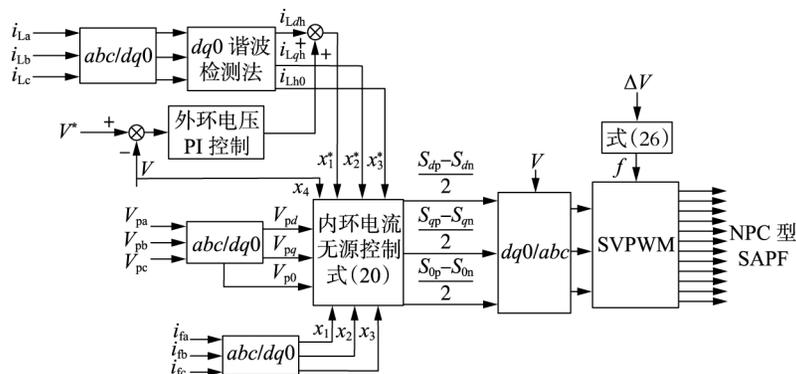


图 2 NPC 型三电平 SAPF 的非线性无源控制框图

Fig.2 Nonlinear passivity-based control block diagram of NPC-type three-level SAPF

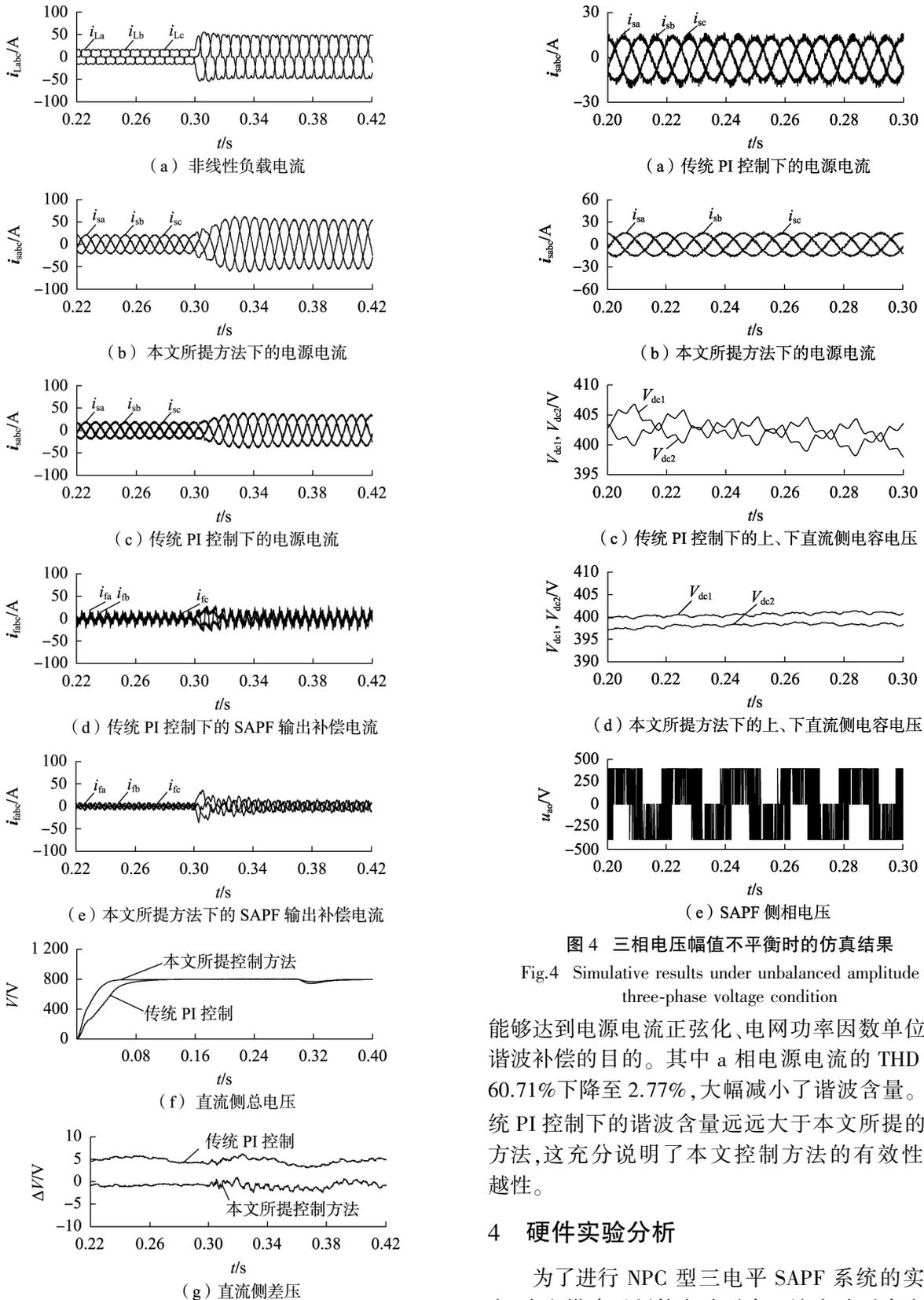


图 3 三相电压平衡时的仿真结果

Fig.3 Simulative results under balanced three-phase voltage condition

电压的相角不平衡,其他参数如附录中表 A1 所示。仿真结果如图 5 所示。

由图 5 可见,经本文控制方法的 SAPF 补偿后,

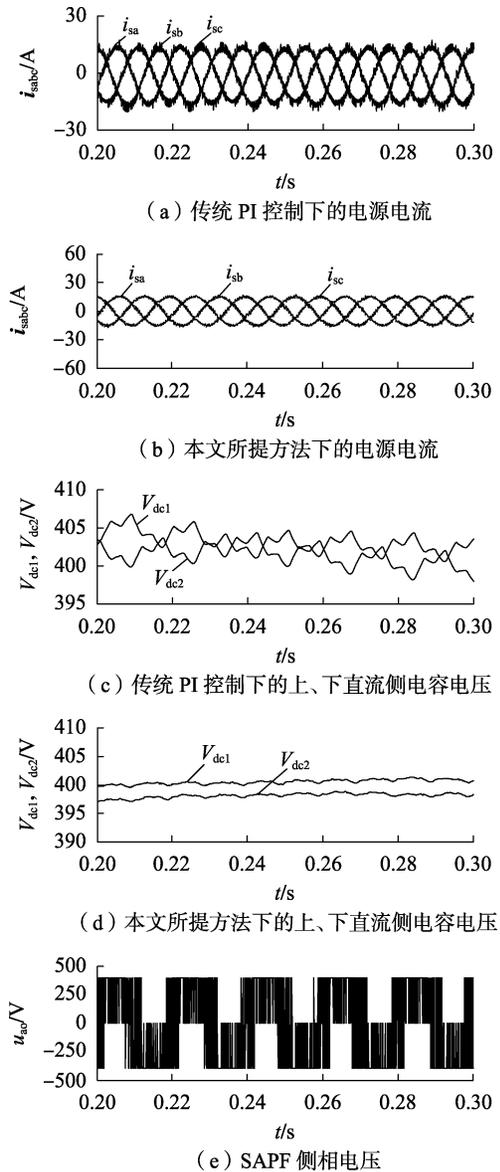


图 4 三相电压幅值不平衡时的仿真结果

Fig.4 Simulative results under unbalanced amplitude of three-phase voltage condition

能够达到电源电流正弦化、电网功率因数单位化和谐波补偿的目的。其中 a 相电源电流的 THD 值由 60.71% 下降至 2.77%, 大幅减小了谐波含量。而传统 PI 控制下的谐波含量远远大于本文所提的控制方法,这充分说明了本文控制方法的有效性和优越性。

4 硬件实验分析

为了进行 NPC 型三电平 SAPF 系统的实验研究,本文搭建了硬件实验平台。该实验平台主要包括与仿真参数相同的交流源、阻感负载、型号为 TMS320F28335 的 DSP 控制器、NPC 型三电平逆变器(由 12 个型号为 IKW30N60T 的绝缘栅双极晶体管 and 6 个型号为 VS-30EPF12 的二极管构成),如附录中图 A1 所示。

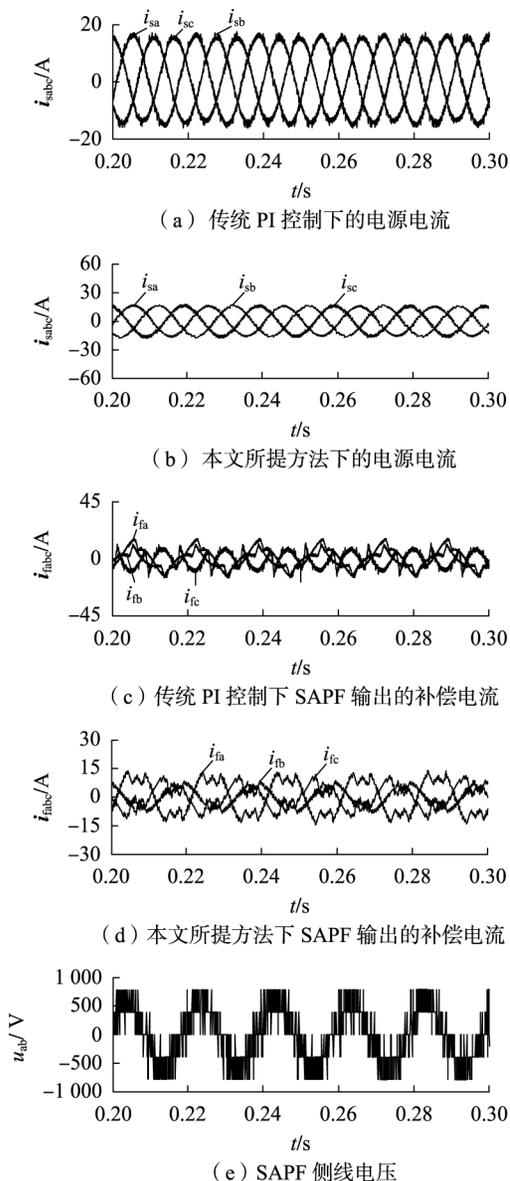


图 5 三相电网电压相角不平衡时的仿真结果

Fig.5 Simulative results under unbalanced phase of three-phase voltage condition

图 6 为三相电源电压有效值均为 220 V, 突然将负载值减小为一半时的实验结果, 图中由上至下依次为 a 相电源电流、a 相负载电流、a 相补偿电流和上、下直流侧电容电压的波形图; 附录中图 A2 为电网电压平衡时 0~0.3 s 内电网电流 THD 值对比。

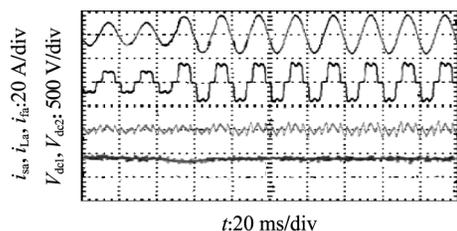


图 6 电压平衡时的实验结果

Fig.6 Experimental results under balanced three-phase voltage condition

图 7 为三相电源电压有效值分别为 220 V、150 V 和 192 V 时的实验结果, 图中由上至下依次为三相电网电压、a 相负载电流、a 相电源电流和 SAPF 侧相电压的波形图; 附录中图 A3 为三相电压幅值不平衡时补充仿真曲线。

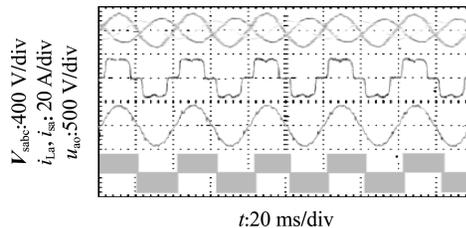


图 7 电压幅值不平衡时的实验结果

Fig.7 Experimental results under unbalanced amplitude of three-phase voltage condition

图 8 为三相电源电压有效值均为 220 V 且相角分别为 0° 、 -90° 和 60° 时的实验结果, 图中由上至下依次为三相电网电压、a 相负载电流、a 相电源电流、SAPF 侧线电压的波形图; 附录中图 A4 为三相相角不平衡时补充仿真曲线。

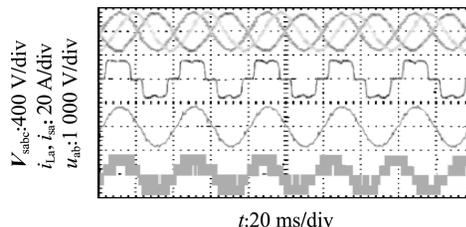


图 8 电压相角不平衡时的实验结果

Fig.8 Experimental results under unbalanced phase of three-phase voltage condition

由图 6—8 可见, 本文所提方法控制下的 SAPF 能有效补偿谐波和无功电流, 使直流侧总电压 V 达到给定值, 同时保证直流侧差压 $\Delta V \approx 0$, 且具有良好的动静态特性。因此, 硬件样机上的实验结果也验证了本文方法的正确性和有效性。

5 结论

本文对 NPC 型三电平 SAPF 的数学模型进行了分析, 提出了针对 SAPF 非线性无源控制策略的新型控制方法, 通过软件仿真和硬件实验得到以下结论。

a. 根据被控对象的无源性, 建立了 SAPF 的 EL 模型, 提出了能使 SAPF 的内环补偿电流完全解耦的无源控制规律。相比于传统的 PI 控制方法, 本文所提的控制方法无需对谐波的正负序分量进行处理。

b. 无源控制器结构简单、可调参数少, 利用“无功功率”可进一步简化无源控制器的设计, 且能够在电网平衡/不平衡条件下, 快速有效地对谐波和无功进行补偿, 实现电网电流正弦化, 进一步降低谐波

含量。

c. 根据电荷平衡原理,引入调节因子 f 来调节 SVPWM 中正负小矢量的作用时间,能够有效地维持直流侧电容电压的平衡。

采用无源控制仍需依靠精确的数学模型及系统的参数,而实际系统中会存在一些不确定因素会造成系统模型及参数的变化,从而影响其控制效果。因此,应进一步研究消除不确定因素对无源控制影响的方法。

附录见本刊网络版 (<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] ACUNA P, MORAN L, RIVERA M, et al. Improved active power filter performance for renewable power generation systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2) : 687-694.
- [2] 高范强, 朱海滨, 李子欣, 等. 三相角型 APF 补偿电流参考值计算方法 [J]. 电网技术, 2014, 38(10) : 2919-2925.
GAO Fanqiang, ZHU Haibin, LI Zixin, et al. Extraction method of compensation current reference for three-phase delta-connected active power filter [J]. Power System Technology, 2014, 38(10) : 2919-2925.
- [3] 杨新华, 谢兴峰, 马建立, 等. 并联有源滤波器的一种高可靠性控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5) : 128-133.
YANG Xinghua, XIE Xingfeng, MA Jianli, et al. A high-reliability control strategy for shunt active filter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5) : 128-133.
- [4] 梁莹玉, 刘建政, 许杏桃, 等. 基于电源电流和负载电流检测的前馈加反馈的三相四线制 APF 控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1) : 94-100.
LIANG Yingyu, LIU Jianzheng, XU Xingtiao, et al. Three-phase four-wire APF control strategy based on feed-current and feedback of power supply current and load current detection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1) : 94-100.
- [5] FENG L, WANG Y. Modeling and resonance control of modular three level shunt active power filter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 45(12) : 1-10.
- [6] 张百乐, 王久和, 赵凤姣. TNPC 型光伏并网逆变器的 PCHD 建模与控制 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(增刊 1) : 204-210.
ZHANG Baile, WANG Jiuhe, ZHAO Fengjiao. The PCHD model and control of TNPC PV grid-connected inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(Supplement 1) : 204-210.
- [7] 胡健, 陈文宪, 陈冬冬, 等. 基于中线电流注入的三电平有源电力滤波器中点平衡策略 [J]. 电网技术, 2014, 38(11) : 3160-3165.
HU Jian, CHEN Wenxian, CHEN Dongdong, et al. A neutral current injection based neutral point potential control strategy for neutral point clamping based tri-level shunt active power filter [J]. Power System Technology, 2014, 38(11) : 3160-3165.
- [8] 黄海宏, 江念涛, 黄楠楠, 等. 三电平有源电力滤波器死区效应分析与补偿 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11) : 99-103.
HUANG Haihong, JIANG Niantao, HUANG Nannan, et al. Dead zone effect analysis and compensation of three-level active power filter [J]. Electric Automation Equipment, 2017, 37(11) : 99-103.
- [9] REZKALLAH M, SHARMA S K, CHANDRA A, et al. Lyapunov function and sliding mode control approach for solar-PV grid interface system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(1) : 785-795.
- [10] LI T, FEI J. Feedback linearization control of a shunt active power filter using a fuzzy controller [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10(9) : 332-338.
- [11] 孟超, 李钜, 洪永强. 无变压器并联混合型有源电力滤波器的无源性控制 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7) : 108-112.
MENG Chao, LI Po, HONG Yongqiang. A novel passive control strategy for transformerless shunt hybrid active power filter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7) : 108-112.
- [12] 许胜, 费树岷, 赵剑锋. 基于电容电流反馈的新型 HAPF 谐振抑制方法 [J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5) : 55-60.
XU Sheng, FEI Shumin, ZHAO Jianfeng. Novel HAPF resonance suppression method based on capacitive current feedback [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5) : 55-60.
- [13] 王久和, 杨秀媛. 电网不平衡时电压型 PWM 整流器控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(18) : 14-20.
WANG Jiuhe, YANG Xiuyuan. Control strategy of voltage source PWM rectifiers under unbalanced voltage conditions [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(18) : 14-20.
- [14] MEHRASA M, LESAN S, EMENI S N H, et al. Passivity-based control with dual Lagrangian model of four-wire three-level three-phase NPC voltage-source rectifier [C] // Compatibility and Power Electronics. Badajoz, Spain: IEEE, 2009: 411-418.
- [15] 马兴, 刘会金, 张振环, 等. 无源性控制策略在谐波/间谐波统一补偿的单相有源电力滤波器中的应用 [J]. 电网技术, 2015, 39(5) : 1419-1424.
MA Xing, LIU Huijin, ZHANG Zhenhuan, et al. Application of passive control strategy in single-phase active power filter for harmonic and inter-harmonics unity compensation [J]. Power System Technology, 2015, 39(5) : 1419-1424.
- [16] 王久和. 电能变换器及其无源控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 59-76.
- [17] 薛花, 王育飞. 基于无源性的并联型有源滤波器自适应滑模控制 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9) : 60-64.
XUE Hua, WANG Yufei. Passivity-based adaptive sliding mode control of shunt active filters [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9) : 60-64.
- [18] MISSANDA A, AL-HADDAD K, MENDELEK N. Nonlinear control of three-phase three-level four-wire NPC converter [C] // 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Taipei, China: IEEE, 2016: 1254-1259.
- [19] 孙华, 张晓, 孔令军, 等. 三电平 APF 直流侧电容电压控制研究 [J]. 电力电子技术, 2011, 45(5) : 49-51.
SUN Hua, ZHANG Xiao, KONG Lingjun, et al. Research on the control algorithm of DV capacitor voltage for active power filter with a three-level inverter [J]. Power Electronics, 2011, 45(5) : 49-51.
- [20] 田铭兴, 杨雪淞, 阎宏, 等. 基于负载电流谐波特征的并联型有源电力滤波器交流电感额定值计算公式 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10) : 90-94.
TIAN Mingxing, YANG Xuesong, YAN Hong, et al. Calculation formula of AC inductance rating of shunt active power filter based on harmonic characteristics of load current [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10) : 90-94.

作者简介:



程启明

程启明(1965—),男,江苏盐城人,教授,研究方向为电力系统自动化、发电过程控制、先进控制及应用(E-mail:chengqiming@sina.com);

孙伟莎(1993—),女,山东菏泽人,硕士研究生,通信作者,研究方向为电力系统自动化、新能源发电控制;

程尹曼(1990—),女,上海人,硕士研究生,研究方向为电力系统自动化、新能源发电控制;

张宇(1992—),女,江苏淮安人,硕士研究生,研究方向为电力系统自动化、电机控制;

谭冯忍(1992—),女,安徽淮北人,硕士研究生,研究方向为电力系统自动化、新能源发电控制;

高杰(1993—),男,浙江温州人,硕士研究生,研究方向为电力系统自动化、继电保护。

Nonlinear passivity-based control strategy of NPC-type three-level three-phase four-wire SAPF

CHENG Qiming¹, SUN Weisha¹, CHENG Yinman², ZHANG Yu¹, TAN Fengren¹, GAO Jie¹

(1. Shanghai Key Laboratory Power Station Automation Technology Laboratory, College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A nonlinear passivity-based control strategy of SAPF(Shunt Active Power Filter) is proposed to overcome the shortcoming of linear controllers dependent on local linearization method. Firstly, according to the EL(Euler-Lagrange) mathematical model of the controlled object in the $dq0$ coordinate system, the passivity of the NPC(Neutral-Point Clamped)-type three-level three-phase four-wire SAPF is analyzed. Secondly, the energy storage function is constructed, and the passivity-based control law that ensures the controlled quantity converge to the expected value is obtained from the energy point of view. Thirdly, the damping injection method is employed to simplify the design of the system and further improve the dynamic performance of the system, which contributes to the decoupling of inner-loop current. Finally, the simulation and hardware experiment of the nonlinear passivity-based control of the proposed NPC three-level SAPF are carried out. Simulative and experimental results show that the proposed NPC-type three-level SAPF based on nonlinear passive control strategy can effectively achieve low-order harmonic current, DC-side voltage stability and neutral-point voltage balance in cases of both balanced and unbalanced power grids. Meanwhile, compared to the traditional PI control, the proposed control method exhibits a superior compensation effects.

Key words: three-phase four-wire system; SAPF; passivity-based control; Euler-Lagrange model; neutral-point voltage balance control; unbalanced power grid

(上接第106页 continued from page 106)

A load clustering algorithm based on discrete wavelet transform and fuzzy K -modes

ZHANG Jianglin^{1,2}, ZHANG Yachao³, HONG Juhua¹, GAO Hongjun¹, LIU Junyong¹

(1. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. School of Control Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;
3. State Grid Chongqing Qinan Power Supply Company, Chongqing 401420, China)

Abstract: In order to study the power consumption modes of users under the background of smart grid, a fuzzy K -modes clustering algorithm based on discrete wavelet transform is proposed considering the deficiencies of existing clustering algorithms. The load curves in the time domain are converted to the frequency domain by the discrete wavelet transform, so that the different features of load curve can be isolated at different frequency domain levels. The effective component curves of the primitive curve are selected by the idea of lower order approximation. The selected component curves are coded and the continuous load data are translated into discrete attribute data. The initial clustering condition is determined based on average density and the shapes of curves are clustered by the fuzzy K -modes clustering algorithm, based on which, the load curve forms are obtained. The effectiveness of the proposed algorithm is verified by comparing it with the traditional K -means algorithm and the hierarchical clustering algorithm.

Key words: smart grid; load clustering; discrete wavelet transform; fuzzy K -modes clustering algorithm; power consumption mode

附 录

表 A1 NPC 型三电平三相四线制 SAPF 仿真参数

Table 1 Simulation parameters of NPC-type three-level three-phase four-wire SAPF

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|-----------------------------|-------|-------------------|-----------|
| 电源电压(有效值)/V | 220 | 电源频率/ Hz | 50 |
| 电网感抗 R_s/Ω | 0.2 | 电网阻抗 L_s/mH | 0.5 |
| 负载电阻 R_L/Ω | 30 | 负载电感 L_L/mH | 10 |
| 滤波电阻 R_f/Ω | 0.3 | 滤波电感 L_f/mH | 4 |
| 直流侧电容 $C_d/\mu F$ | 5000 | 直流电压设定值 V^*/V | 800 |
| 注入阻尼 $r_{a1}=r_{a2}=r_{a3}$ | 400 | 本文电压外环 K_p/K_i | 0.15/0.18 |
| PI 电流内环 K_p/K_i | 0.6/1 | PI 电压外环 K_p/K_i | 0.2/0.5 |

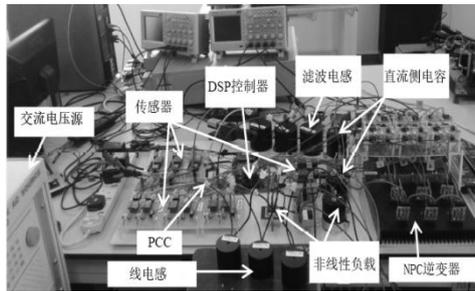
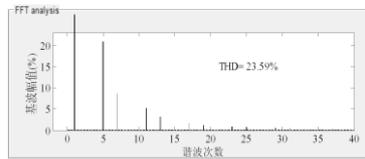
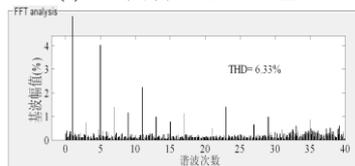


图 A1 实验平台照片

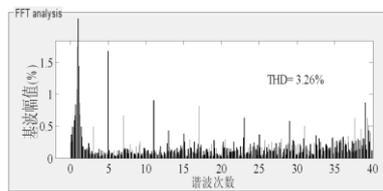
Fig.A1 Photo of experimental platform



(a) a 相负载电流 THD 值



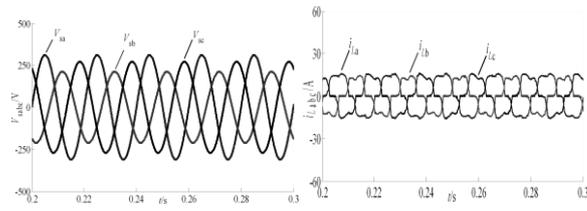
(b) 传统 PI 控制下 a 相电网电流 THD 值



(c) 本文控制方法下 a 相电网电流的 THD 值

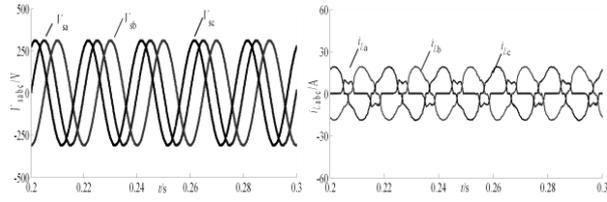
图 A2 电网电压平衡时 0~0.3s 内电网电流谐波 THD 值对比

Fig.A2 Comparison of THD values of harmonic current in 0~0.3s



(a) 电源电压 (b) 非线性负载电流
图 A3 三相电压幅值不平衡时补充仿真曲线

Fig.A3 Supplementary simulation curves when the amplitude of power supply



(a) 电源电压 (b) 非线性负载电流
图 A4 三相相角不平衡时补充仿真曲线

Fig.A4 Supplementary simulation curves when the phase of power supply is unbalanced