

DOI: 10.7667/PSPC160139

## 基于谐波源注入的 SAPF 补偿容量确定方法

刘欣, 李尚盛, 吴楠, 孙建军

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 补偿容量是决定并联型有源电力滤波器(Shunt Active Power Filter, SAPF)补偿性能的重要因素之一。通过戴维南等值模型, 分析了 SAPF 补偿容量的决定因素, 指出了依据补偿前负荷电流作为确定补偿容量的方法存在的缺点。提出了一种基于谐波源注入的 SAPF 补偿容量预估方法, 通过小容量谐波源在接入点分次注入谐波电流, 预估 SAPF 的补偿容量。该方法还提出了谐波源特征系数和补偿容量放大倍数两个指标用于表征负荷的性质, 为 SAPF 的类型和容量的选择提供方向。通过对不同负载模型的仿真实验, 确定该方法比传统方法更加接近真实 SAPF 的补偿容量。

**关键词:** 戴维南等值; 谐波补偿; 补偿容量; SAPF; 补偿性能

### Compensation capacity prediction of SAPF based on harmonic source injection

LIU Xin, LI Shangsheng, WU Nan, SUN Jianjun

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Compensation capacity plays an important role in the operation performance of shunt active power filter (SAPF). The determinants of SAPF compensation capacity are analyzed by Thevenin equivalent model of grid and load. The shortcoming of compensation capacity calculation method according to load current before compensated is pointed out. Furthermore, a compensation capacity prediction method of SAPF based on harmonic source injection which uses small capacity harmonic source is proposed. Characteristic coefficient of harmonic source and compensation capacity magnification are also given, which provides direction to type and capacity selection of SAPF. Ultimately, availability of the method is testified through simulation. Compared with the traditional method, this method is more close to the real capacity of APF.

**Key words:** Thevenin equivalent; harmonic compensation; compensation capacity; shunt active power filter; compensating characters

## 0 引言

随着电网中电力电子装置和非线性负荷的日益增多, 电力系统的谐波污染日益严重。有源电力滤波器(Active Power Filter, APF)是解决电力系统谐波污染的有效手段, 特别是并联型 APF 更是得到广泛的应用。文献[1-6]认为当 SAPF 的补偿容量足够时, 通过控制算法的调整, 可以很好地解决现场的谐波问题。因此, SAPF 补偿容量的选择至关重要。

文献[7]对电感性和电容性谐波源补偿特性进行了分析, 指出了 SAPF 适合补偿电感性谐波源, 对电容性谐波源补偿效果不佳。文献[8]指出, SAPF 在补偿电压源型非线性负载时, 存在显著的谐波电流放大效应, 文章的分析认为该问题可归因于补偿

前后负荷电流的变化。文献[9]采用补偿前的负荷电流作为 SAPF 的补偿容量, 该方法由于未考虑负荷模型而使补偿容量的预估存在较大误差。文献[10-12]讨论了在已知系统的详细模型和参数的情况下, 对 SAPF 的安装容量和安装位置的最优化求解方法, 该方法仿真建模复杂且较难进行现场应用。

本文首先建立系统及负荷在谐波下的戴维南等值模型, 通过补偿前后的模型分析表明补偿前后负荷谐波电流存在明显差异。指出采用传统测量方法得到补偿容量的不准确性, 而后, 考虑不同谐波注入时负荷等值模型参数的变化, 而计算出最终的 SAPF 补偿容量。本文在三种典型谐波负荷上进行了仿真实验, 仿真结果表明, 文章所提的方法可以在较小的谐波注入量下, 得到较高的 SAPF 补偿容

量预估精度。

### 1 戴维南等值模型

对于 SAPF 补偿容量的研究主要是考虑稳态下的情况。补偿前后，由于 PCC 点电压发生变化，负荷侧谐波电压源和谐波阻抗不同。补偿前的负荷侧等值参数用下标“1”表示；理想补偿后的负荷侧等值参数用下标“2”表示。在进行分析时假设各次谐波相互独立，即不考虑各次谐波之间的耦合关系。

图 1 为补偿前，第  $n$  次谐波的戴维南等值模型。从 PCC 点，将电网模型分为系统侧和负荷侧两部分<sup>[13]</sup>。其中， $\dot{U}_{Sn}$  为系统侧第  $n$  次背景谐波电压源； $Z_{Sn}$  为系统侧第  $n$  次等值谐波阻抗； $\dot{U}_{Ln1}$  为负荷侧第  $n$  次谐波电压源， $Z_{Ln1}$  为负荷侧第  $n$  次等值谐波阻抗； $\dot{U}_{PCCn}$  为公共连接点 PCC 的第  $n$  次谐波电压； $\dot{I}_{Sn1}$  和  $\dot{I}_{Ln1}$  分别为系统侧和负荷侧第  $n$  次谐波电流。补偿前，系统侧与负荷侧电流相等，有式(1)成立。

$$\dot{I}_{Sn1} = \dot{I}_{Ln1} = \frac{\dot{U}_{Ln1} - \dot{U}_{Sn}}{Z_{Ln1} + Z_{Sn}} \quad (1)$$

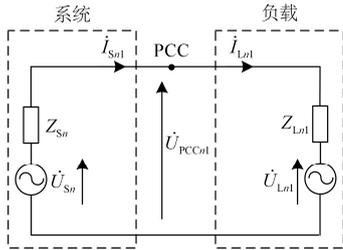


图 1 补偿前电网戴维南等值模型

Fig. 1 Thevenin equivalent model of power grid before the compensation

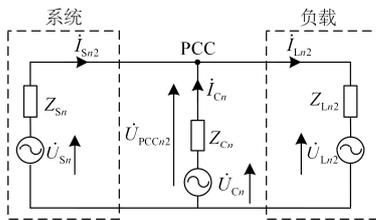


图 2 补偿后电网戴维南等值模型

Fig. 2 Thevenin equivalent model of power grid after compensation

图 2 为补偿后，第  $n$  次谐波的戴维南等值模型。 $\dot{U}_{Cn}$  为 SAPF 第  $n$  次谐波电压源； $Z_{Cn}$  为 SAPF 第  $n$  次谐波阻抗； $\dot{I}_{Cn}$  为 SAPF 第  $n$  次谐波电流。

理想补偿后，系统侧谐波电流为零，对于第  $n$  次谐波电流，有式(2)成立。

$$\dot{I}_{Sn2} = \dot{I}_{Ln2} - \dot{I}_{Cn} = 0 \quad (2)$$

此时，图 2 的等值模型可调整为图 3 所示，则理想补偿后的第  $n$  次谐波电流满足式(3)。

$$\dot{I}_{Cn} = \dot{I}_{Ln2} = \frac{\dot{U}_{Sn} - \dot{U}_{Cn}}{Z_{Cn}} = \frac{\dot{U}_{Ln2} - \dot{U}_{Sn}}{Z_{Ln2}} \quad (3)$$

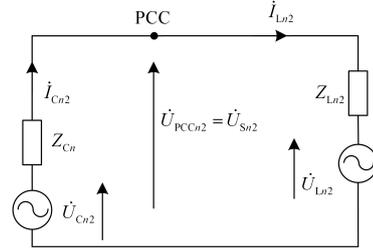


图 3 理想补偿后的简化模型

Fig. 3 Simplified model of the ideal compensation

假设补偿前后，系统侧背景谐波电压源及谐波阻抗不变，则从式(1)和式(3)可以看出，补偿前后，负荷谐波电流大小的区别取决于系统阻抗与负荷阻抗的比值，以及理想补偿后负荷的谐波电压源与谐波阻抗的变化量。系统阻抗与负荷阻抗的比值越大，补偿前后的电流差别越大；若能准确得到补偿后的负荷谐波电压源与谐波阻抗，就可根据式(3)准确求出 SAPF 理想补偿容量。

### 2 基于谐波源注入的补偿容量预估

从上一节的结论可以看出，SAPF 得到理想补偿容量的关键在于系统侧和负荷侧的戴维南等值参数的获得。然而由于补偿前后负荷侧戴维南等值参数的变化，使得这一结果无法得到<sup>[14-16]</sup>。对于任意运行点，由图 1 可得方程组(4)。

$$\begin{cases} \dot{U}_{Sn} = \dot{I}_{PCCn1} Z_{Sn1} + \dot{U}_{PCCn1} \\ \dot{U}_{PCCn1} = \dot{I}_{PCCn1} Z_{Ln1} + \dot{U}_{Ln1} \end{cases} \quad (4)$$

其中，只有  $\dot{U}_{PCCn1}$ ， $\dot{I}_{PCCn1}$  ( $\dot{I}_{Ln1}$ ) 可通过现场测量得到， $\dot{U}_{Sn}$ ， $Z_{Sn}$ ， $\dot{U}_{Ln1}$ ， $Z_{Ln1}$  均是待求量。只有增加一组不同的测量值，才能得到待求量的解。为了增加一组测量量，可以在 PCC 处增加一扰动源，扰动源可以发出任意次谐波电流，扰动源注入的原理如图 4 所示，加入扰动源后的戴维南等值模型如图 5 所示，K 为投切开关。 $\dot{U}_{PCCn3}$ ， $\dot{I}_{PCCn3}$  为在图 4 工况下 PCC 点的电压、电流。但是增加一组工况获得负荷侧的戴维南参数就会发生变化，所以本文假设扰动源注入的电流很小，可以认为没有注入和有扰动源注入后的负荷戴维南参数不变。

K 闭合后，根据图 4 电路可列出方程组(5)。

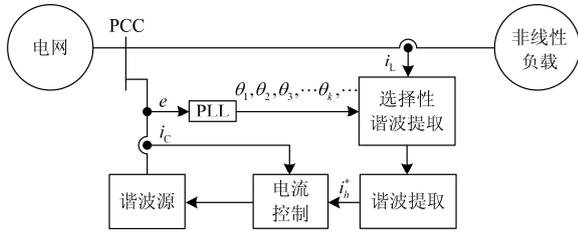


图 4 谐波源注入原理图

Fig. 4 Schematic diagram of harmonic source injection

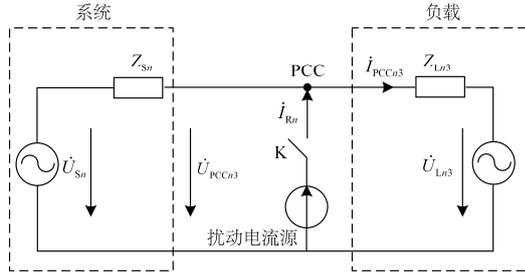


图 5 带扰动电流源的电网等效模型

Fig. 5 Grid equivalent model with perturbation current source

$$\begin{cases} \dot{U}_{Sn} = (\dot{I}_{PCCn3} - \dot{I}_{Rn})Z_{Sn} + \dot{U}_{PCCn3} \\ \dot{U}_{PCCn3} = \dot{I}_{PCCn3}Z_{Ln3} + \dot{U}_{Ln3} \end{cases} \quad (5)$$

且由假设：负荷戴维南等值参数不变，可得式(6)成立。

$$\begin{cases} \dot{U}_{Ln1} = \dot{U}_{Ln3} = \dot{U}'_{Ln} \\ Z_{Ln1} = Z_{Ln3} = Z'_{Ln} \end{cases} \quad (6)$$

根据式(4)~式(6)可解出系统侧参数  $\dot{U}_{Sn}$ 、 $Z_{Sn}$  和负载侧参数  $\dot{U}'_{Ln}$ 、 $Z'_{Ln}$ 。因此，根据式(3)可得到预估的补偿后负荷第  $n$  次谐波电流  $I_{cn}$  如式(7)所示。

$$I_{cn} = \frac{\dot{U}'_{Ln} - \dot{U}_{Sn}}{Z'_{Ln}} \quad (7)$$

### 3 补偿容量预估的两个指标

由于在采用谐波注入法得到的容量是将负荷侧的戴维南参数假设为不变，所以装置容量预估的结果和理想补偿容量间存在一定的误差，但是能够正确地反映理想补偿容量的趋势。为了更好地应用预估结果，本文提出了两种实用的评价指标。

#### 3.1 指标一：谐波源特征系数

现阶段的谐波负荷研究中，常将谐波负荷分为电流型谐波负荷和电压型谐波负荷两类进行讨论，但是两者间并没有明确的界限。针对此，本文提出谐波源特征系数  $k_{cn}$ ，如式(8)所示。

$$k_{cn} = \frac{Z'_{Ln}}{Z'_{Ln} + Z_{Sn}} \quad (8)$$

其中，下标“ $n$ ”表示第  $n$  次谐波，因此  $k_{cn}$  是针对单次谐波定义的。

当负荷第  $n$  次谐波模型接近理想电流源时，其戴维南等值参数中负荷谐波阻抗远大于系统谐波阻抗，此时谐波源特征系数接近 1；当负荷第  $n$  次谐波模型接近理想电压源时，其戴维南等值参数中负荷谐波阻抗远小于系统谐波阻抗，此时，谐波源特征系数接近 0。根据谐波源特征系数的取值，可以为各次谐波的负荷性质判断提供有力依据。

#### 3.2 指标二：预估补偿容量放大倍数

在定义预估补偿容量之前先定义一个指标：补偿后负荷谐波电流预估放大倍数  $a_{cn}$ ，如式(9)所示。

$$a_{cn} = \frac{I_{cn}}{I_{Ln1}} \quad (9)$$

式中： $I_{cn}$ 是指预估的补偿后负荷第  $n$  次谐波电流； $I_{Ln1}$ 是指补偿前负荷第  $n$  次谐波电流。由式(1)、式(7)、式(8)可知， $k_{cn}$ 和  $a_{cn}$ 互为倒数关系。

由于 SAPF 的补偿容量可用电流来标称，则 SAPF 的预估补偿容量  $I_E$  可通过预估的补偿后的负荷特征次谐波电流计算而得。

### 4 仿真试验

仿真试验分别采用传统法和谐波源注入法得到预估的补偿容量，并将其与理想补偿容量进行对比。在电力系统仿真软件 PSCAD 中搭建模型电路，对某一次谐波注入下得到系统侧的电压和电流，在 MATLAB 中进行计算得到  $\dot{U}_{Sn}$ 、 $Z_{Sn}$ 、 $\dot{U}_{Ln1}$ 、 $Z_{Ln1}$  的值，再由式(7)就可以得到预估的容量。仿真模型选用典型电流源型负载(模型一)、典型电压源型负载(模型二)、典型混合型负载(模型三)。

仿真模型一如图 6 所示。

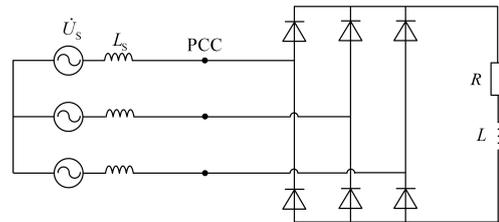


图 6 典型电流源型负载(模型一)

Fig. 6 Typical current source load (model 1)

其中， $U_s = 220 \text{ V}$ ， $L_s = 0.1 \text{ mH}$ ， $R = 2 \Omega$ ， $L = 2 \text{ mH}$ 。采用谐波源注入法(谐波注入量为谐波波流量的 20%)辨识模型一参数，如表 1 所示。三相不控整流桥的谐波特征次为  $6k \pm 1 (k = 1, 2, 3 \dots)$ ，以下以 5, 7, 11, 13 次谐波为例进行分析。

在 PCC 点处安装 SAPF 进行谐波补偿，则 SAPF

的补偿容量计算结果如表 2 所示。表 2 同时给出了 流预估放大倍数  $a_{cn}$ 。两个指标：谐波源特征系数  $k_{cn}$ 、补偿后负荷谐波电

表 1 模型一辨识参数

Table 1 Model 1 identification parameters

$n$	$\dot{U}_{Sn} / V$	$Z_{Sn} / \Omega$	$\dot{U}_{Cn} / V$	$Z_{Cn} / \Omega$
5	$0.5644 \angle 88.3166^\circ$	$0.1498 \angle 3.1449^\circ$	$49.8422 \angle -54.7404^\circ$	$1.2234 \angle -20.3136^\circ$
7	$0.2153 \angle 71.0507^\circ$	$0.2147 \angle -0.5323^\circ$	$35.5941 \angle -69.1182^\circ$	$1.52 \angle -26.691^\circ$
11	$0.3024 \angle 31.6167^\circ$	$0.3422 \angle 1.086^\circ$	$27.4881 \angle 80.9063^\circ$	$1.9065 \angle -23.481^\circ$
13	$0.1408 \angle -7.6333^\circ$	$0.4066 \angle -1.3505^\circ$	$21.7651 \angle 74.1724^\circ$	$2.0263 \angle -15.9043^\circ$

表 2 模型一 SAPF 容量计算

Table 2 SAPF capacity calculation of model 1

	$n=5$	$n=7$	$n=11$	$n=13$	补偿容量
传统法	36.26	20.65	12.28	8.98	44.41
谐波注入法	40.37	23.31	14.32	10.73	49.93
理想容量	41.09	26.62	17.72	14.65	54.09
$k_{cn}$	0.88	0.78	0.69	0.61	
$a_{cn}$	1.14	1.28	1.45	1.64	

由表 2 可以看出,  $k_{cn}$  相对靠近 1, 负载偏电流源型。通过比较采用传统法和谐波注入法得到的补偿容量与理想补偿容量, 可以看出, 谐波注入法得到的 SAPF 的补偿容量更加接近理想的补偿容量, 所以本文提出的谐波注入法对于电流源型谐波负载更加准确可靠。同时  $a_{cn}$  也是相对靠近 1, 说明第  $n$

次谐波电流补偿前后放大倍数并不大, 表明 SAPF 对偏向电流源型负荷的补偿效果较理想。

仿真模型二如图 7 所示。

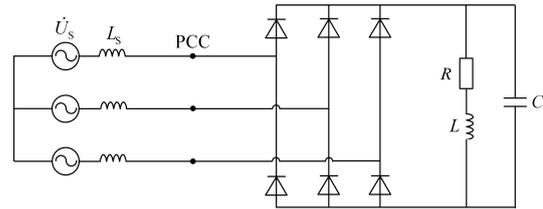


图 7 典型电压源型负载(模型二)

Fig. 7 Typical voltage source type load (model 2)

其中,  $U_s = 220 V$ ,  $L_s = 0.1 mH$ ,  $R = 2 \Omega$ ,  $L = 2 mH$ ,  $C = 10000 \mu F$ 。则模型二的参数辨识结果为表 3。

表 3 模型二辨识参数

Table 3 Model 2 identification parameters

$n$	$\dot{U}_{Sn} / V$	$Z_{Sn} / \Omega$	$\dot{U}_{Cn} / V$	$Z_{Cn} / \Omega$
5	$1.0882 \angle -79.7649^\circ$	$0.1718 \angle -5.3051^\circ$	$17.1925 \angle -67.5709^\circ$	$0.1204 \angle -47.7236^\circ$
7	$0.6794 \angle -40.0357^\circ$	$0.1997 \angle -15.2387^\circ$	$5.1571 \angle 64.3268^\circ$	$0.1533 \angle -40.1697^\circ$
11	$0.5116 \angle 37.4506^\circ$	$0.3711 \angle -9.813^\circ$	$6.95 \angle 87.9165^\circ$	$0.2646 \angle -22.1596^\circ$
13	$0.252 \angle -87.063^\circ$	$0.4543 \angle -12.823^\circ$	$2.7161 \angle -37.5603^\circ$	$0.3262 \angle -25.5477^\circ$

模型二的 SAPF 补偿容量计算如表 4 所示。

表 4 模型二 SAPF 容量计算

Table 4 SAPF capacity calculation of model 2

	$n=5$	$n=7$	$n=11$	$n=13$	补偿容量
传统法	66.87	14.59	11.53	3.72	69.51
谐波注入法	151.64	32.83	27.54	8.85	157.83
理想容量	168.93	132.07	63.49	41.81	227.51
$k_{cn}$	0.40	0.11	0.18	0.09	
$a_{cn}$	2.50	9.09	5.56	11.11	

由表 4 可以看出,  $k_{cn}$  相对靠近 0, 则负载偏电压源型。此时, 通过比较采用传统法和谐波注入法得到的补偿容量与理想补偿容量, 可以看出, 采用

谐波注入法得到的 SAPF 的补偿容量更加接近理想补偿容量。从表 4 中也可以看出  $a_{cn}$  远大于 1, 说明第  $n$  次谐波电流补偿前后放大倍数很大, 表明 SAPF 对偏向电压源型负荷的补偿效果并不理想。

仿真模型三如图 8 所示。

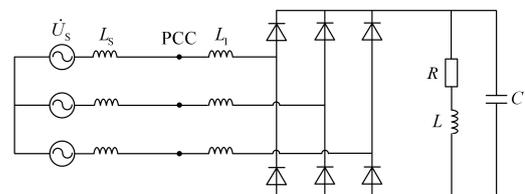


图 8 典型混合型负载(模型三)

Fig. 8 Typical hybrid load (model 3)

其中,  $U_s = 220 \text{ V}$ ,  $L_s = 0.1 \text{ mH}$ ,  $R = 2 \Omega$ , 的参数辨识结果为表 5。  
 $L_1 = 0.2 \text{ mH}$ ,  $L = 2 \text{ mH}$ ,  $C = 10\,000 \mu\text{F}$ 。则模型三

表 5 模型三辨识参数

Table 5 Model 3 identification parameters

$n$	$\dot{U}_{Sn} / \text{V}$	$Z_{Sn} / \Omega$	$\dot{U}_{Cn} / \text{V}$	$Z_{Cn} / \Omega$
5	$0.2982 \angle 38.047^\circ$	$0.1604 \angle -4.576^\circ$	$25.5979 \angle -73.275^\circ$	$0.4331 \angle 11.969^\circ$
7	$0.1269 \angle 66.711^\circ$	$0.2296 \angle -5.134^\circ$	$9.9818 \angle -48.567^\circ$	$0.6813 \angle 5.629^\circ$
11	$0.1553 \angle -69.830^\circ$	$0.3445 \angle -7.083^\circ$	$10.1913 \angle 11.534^\circ$	$1.0994 \angle 0.319^\circ$
13	$0.1051 \angle 80.438^\circ$	$0.4074 \angle -6.605^\circ$	$8.8657 \angle 19.297^\circ$	$1.3279 \angle 1.927^\circ$

模型三的 SAPF 容量计算如表 6 所示。

表 6 模型三 SAPF 容量计算

Table 6 SAPF capacity calculation of model 3

	$n=5$	$n=7$	$n=11$	$n=13$	补偿容量
传统法	43.68	11.06	7.09	5.09	45.90
谐波注入法	59.37	14.73	9.29	6.64	62.23
理想容量	58.03	15.97	11.27	6.30	61.56
$k_{cn}$	0.75	0.69	0.63	0.81	
$a_{cn}$	1.33	1.45	1.59	1.23	

由表 6 可以看出,  $k_{cn}$  相对靠近 0.5, 则负载偏混合源型。此时, 通过比较采用传统法和谐波注入法得到的补偿容量与理想补偿容量, 可以看出, 本文提出的谐波源注入法计算的 SAPF 补偿容量与理想补偿容量较接近, 误差较小。同时也可以看出  $a_{cn}$  不大, 说明第  $n$  次谐波电流补偿前后放大倍数不是很大, 表明 SAPF 对混合源型负荷的补偿效果较好。

## 5 结论

本文基于负载戴维南等值模型, 对 SAPF 补偿容量进行预估。通过假设在扰动源的注入量较小的情况下, 未注入和注入的系统侧和负载的戴维南参数不发生变化, 于是可以用谐波源注入法对系统以及负载参数进行辨识, 进而利用辨识参数对 SAPF 补偿容量进行估计。基于辨识出的参数, 文中提出了两个指标: 谐波源特征系数  $k_{cn}$  和谐波电流预估放大倍数  $a_{cn}$ 。理论和仿真验证: 当  $k_{cn}$  相对靠近 1 时, 负载偏电流源型, 此时谐波源注入法计算 SAPF 补偿容量较准确, 且  $a_{cn}$  略大于 1; 当  $k_{cn}$  相对靠近 0 时, 负载偏电压源型, 此时谐波源注入法计算 SAPF 补偿容量较传统测量法得到的补偿容量准确, 且  $a_{cn}$  远大于 1。可见, 谐波源特征系数  $k_{cn}$  可用于定性判断谐波负载类型, 为 SAPF 类型的选择提供依据。本文提出的基于谐波源注入法估计 SAPF 补偿容量较现有方法具有一定的实用价值。

## 参考文献

- [1] 李建泉, 吴小云, 何星瑶, 等. 集中补偿型 LCL-APF 的有源阻尼控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 101-106.  
LI Jianquan, WU Xiaoyun, HE Xingyao, et al. Research on the active power damping control of LCL-APF based on concentrated compensation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 101-106.
- [2] 陈仲, 王志辉, 陈淼. 一种适用于飞机电网的新型三相四线制有源滤波器[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 175-182.  
CHEN Zhong, WANG Zhihui, CHEN Miao. A novel three-phase four-wire active power filter applicable to aircraft power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 175-182.
- [3] 陈仲, 王志辉, 陈淼. 一种高动态性能的级联型有源电力滤波器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 147-154.  
CHEN Zhong, WANG Zhihui, CHEN Miao. A cascade H-bridge active power filter with high dynamic performance[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 147-154.
- [4] 刘文亚, 姚钢, 何雯, 等. 基于级联多电平的有源滤波器直流侧电压平衡控制[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 94-101.  
LIU Wenya, YAO Gang, HE Luan, et al. Research of DC voltage balance control based on multi-level cascaded APF[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 94-101.
- [5] 易皓, 卓放, 翟灏. 基于矢量谐振调节器的有源电力滤波器网侧电流检测控制方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 72-79.  
YI Hao, ZHUO Fang, ZHAI Hao. Research on source current detection type APF control scheme based on vector resonant regulator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 72-79.
- [6] 代高富, 赵丹, 林鹏峰, 等. 基于 MMC 拓扑的有源滤

- 波器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 74-80.
- DAI Gaofu, ZHAO Dan, LIN Pengfeng, et al. Study of control strategy for active power filter based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 74-80.
- [7] ZHAO Wenqiang, CHEN Guozhu. Approaches to shunt active power filter for application with capacitive nonlinear load[C] // Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Seoul: IEEE, 2009: 1835-1840.
- [8] DAI Ke, LIU Cong, DUAN Kewei, et al. Harmonic compensation characteristics of active power filters to nonlinear loads based on impedance analysis[C] // IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2012, 340-347.
- [9] C.-S. Lam, X.-X. Cui, W.-H. Choi, et al. Minimum inverter capacity design for LC-hybrid active power filters in three-phase four-wire distribution systems[J]. IET Power Electronics, 2012, 5(7): 956-968.
- [10] HONG Ying-yi, CHANG Ying-kwun. Determination of locations and sizes for active power line conditioners to reduce harmonics in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1610-1617.
- [11] BARAN M E, WU F F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 725-734.
- [12] TABATABAEI S M, VAHIDI B, HOSSEINIAN S H, et al. Bacterial foraging-based solution for optimal capacitor allocation in distribution systems[C] // IEEE International Conference on Power and Energy, 2010: 253-258.
- [13] 黄舜, 徐永海. 基于偏最小二乘回归的系统谐波阻抗与谐波发射水平的评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 93-97.
- HUANG Shun, XU Yonghai. Assessing harmonic impedance and the harmonic emission level based on partial least-squares regression method[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 93-97.
- [14] 刘聪, 戴珂, 张树全, 等. 并联型 APF 补偿电压源型非线性负载时谐波电流放大效应的研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(27): 21-28.
- LIU Cong, DAI Ke, ZHANG Shuquan, et al. Harmonic current amplification effect of voltage-source type nonlinear load under compensation by shunt APF[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(27): 21-28.
- [15] 帅智康, 罗安, 祝文姬, 等. 并联型有源电力滤波器容量和最优安装位置的选择方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 92-98.
- SHUAI Zhikang, LUO An, ZHU Wenji, et al. Study on the size and optimal location of shunt active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 92-98.
- [16] 黄舜, 徐永海. 基于偏最小二乘回归的系统谐波阻抗与谐波发射水平的评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 93-97.
- HUANG Shun, XU Yonghai. Assessing harmonic impedance and the harmonic emission level based on partial least-squares regression method[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 93-97.

收稿日期: 2016-01-25; 修回日期: 2016-04-05

作者简介:

刘欣(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为大功率电力电子。E-mail: liuxinwust@126.com

(编辑 魏小丽)