

# 基于虚拟谐波电阻的配电网谐波主动防御系统研究

曾江<sup>1,2</sup>, 熊陶君<sup>1,2</sup>, 谢宝平<sup>1,2</sup>, 赵本强<sup>1,2</sup>, 马海杰<sup>1,2</sup>

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640;

2. 广东省电网智能量测与先进计量企业重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:** 针对传统有源滤波器(APF)只能治理本地谐波源的不足, 提出了基于虚拟谐波电阻的谐波主动防御系统(HADS)。分析了HADS治理配电网谐波的原理, 建立了HADS仿真模型, 提出了谐波功率最大化和谐波畸变率最小化两种控制策略, 并研制工程样机进行了工程示范应用。研究和实验证明, HADS能够有效降低区域谐波污染, 可以成为新型电力系统下的区域谐波治理手段之一。

**关键词:** 谐波主动防御系统; 逆变器; 虚拟谐波电阻; 电能质量; 谐波治理最优化

**中图分类号:** TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24213

## Research on Distribution Network Harmonic Active Defense System Based on Virtual Harmonic Resistance

ZENG Jiang<sup>1,2</sup>, XIONG Taojun<sup>1,2</sup>, XIE Baoping<sup>1,2</sup>, ZHAO Benqiang<sup>1,2</sup>, MA Haijie<sup>1,2</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Measurement and Advanced Metering of Power Grid, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

**Abstract:** Aiming at the deficiency that the traditional active power filter (APF) can only control the local harmonic source, a harmonic active defense system (HADS) based on virtual harmonic resistance was proposed. The principle of harnessing harmonics in distribution network by HADS was analyzed, the HADS simulation model was established, and two control strategies of maximizing harmonic power and minimizing harmonic distortion rate were proposed. An engineering prototype was developed for engineering demonstration application. Theoretical and experiments prove that HADS can effectively reduce regional harmonic pollution and become one of the regional harmonic control means under the novel power system.

**Key words:** harmonic active defense system (HADS); inverter; virtual harmonic resistance; power quality; optimization of harmonic control

随着双碳目标的提出和新型电力系统的建设, 配电网双高特征明显, 具体表现为电源侧的新能源发电占比最终将占据主导地位, 而源网荷储等多个环节呈现高比例电力电子化, 新型电力系统下的谐波特性将出现新的特点<sup>[1-2]</sup>: 1) 谐波污染持续增大, 而且其频段进一步向高频发展; 2) 谐波污染点分散化; 3) 谐波污染时间随机化。新型电力系统中的谐波治理和控制将面临

新的挑战。

传统电力系统遵循“谁污染、谁治理”的原则, 一般通过进行定期谐波普测、在线谐波监测等方法找到谐波源, 由谐波源用户安装有源滤波器(active power filter, APF)或无源滤波器(passive filter, PF)进行谐波治理<sup>[3-5]</sup>。由于新型电力系统中的电力电子设备比例将大幅增加, 谐波污染分散化、随机化, 未来大多数用户都可能向电

**基金项目:** 广东省自然科学基金(2021A1515012616)

**作者简介:** 曾江(1972—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为配网自动化、电能质量分析与控制, Email: zengxy@scut.edu.cn

**通讯作者:** 熊陶君(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量的分析与控制, Email: xiongtaojun@126.com

网注入谐波,让绝大多数用户都安装 APF 或者 PF,对少数时段超标的谐波进行治理是不现实也不经济的<sup>[6-7]</sup>。

因此,新型电力系统的谐波管理需要采用新的策略,就是对于重污染用户,仍然需要采用针对性集中治理,而大多数常规用户,则在电网侧进行谐波污染的区域性统一治理<sup>[8-9]</sup>。因此,本文提出采用基于虚拟谐波电阻的配电网谐波主动防御系统(harmonic active defense system, HADS)的治理手段。

日本学者 Akagi 曾在展望 APF 发展趋势时提出过通过检测电网电压进行谐波治理的有源滤波器<sup>[10]</sup>,文献[11-12]进一步研究了这种电阻型有源滤波器。文献[11]研究了电阻型有源滤波器的等效导纳系数  $KV$  的取值对治理效果的影响,并指出虚拟导纳最优取值与系统阻抗有关;文献[12]指出虚拟导纳取为谐波阻抗倒数可以避免谐波局部放大现象。以上研究大多仅限于实验室范围的理论探索,仅证明了电压检测型谐波治理方式对配电网谐波电压具有治理效果,并未推广到工程应用。在具体实现上,对虚拟导纳的取值方法没有研究,也无法做到各次谐波独立控制,并且以往的研究大多采用基于时域的控制方法,难以消除静差。

文献[13]进一步提出了虚拟谐波电阻方法,并将其应用在光伏逆变器上。但其受限于设备结构无法对零序谐波电压进行治理,且未实现对所有谐波频率的控制。本文构建了基于谐波虚拟电阻的谐波主动防御系统,其特点在于,不需要针对特定线路、用户采集电流,而是通过在接入点处将本身等效为谐波电阻后,降低接入点谐波电压,对非本地负荷产生的谐波具备治理效果,能够进行区域性谐波抑制。同时谐波电阻的存在能够激励谐波源用户主动治理谐波,还起到阻尼谐振的作用。在电流控制方法上,引入快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)在频域上进行控制,实现了对各次谐波独立、无静差的控制效果。在控制治理效果方面提出了两种控制策略:1)最大谐波功率点跟踪策略;2)总谐波畸变率(THD)最小化策略。

本文首先基于中性点接地的 NPC 三电平逆变器建立了 HADS 的仿真模型,并设计谐波电流控制内环和谐波电压外环控制系统,并在仿真模型上验证了谐波功率最大化策略和 THD 最小化

策略,开发了 HADS 样机,并在盐城大丰变电站进行了示范工程应用。仿真、实验和示范工程均验证了谐波主动防御系统的正确性和有效性。

## 1 虚拟谐波电阻技术原理

配电网中通过传统 APF 治理电网谐波的原理是检测接入点以下负载线路的谐波电流,控制 APF 输出等幅反向的谐波电流,达到消除配电网谐波的目的。但由于只检测本地负荷的谐波电流,常规有源电力滤波器治理范围仅限于本地谐波源。在图 1 所示配电网中,若采用传统 APF 做谐波治理设备,当接入点本地负荷 B 仅产生少量谐波,而非本地负荷 A、C 产生大量谐波时,APF 无法对谐波源 A、C 造成的谐波进行治理,设备容量被闲置,造成了资源浪费。

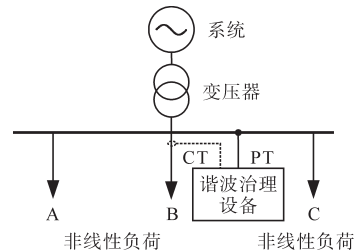


图1 多谐波源下的谐波治理

Fig.1 Harmonic control under multiharmonic sources

为了充分利用设备补偿容量,提出虚拟谐波电阻控制策略。其原理是通过控制电力电子设备端口特性在谐波频段表现为负载电阻,利用虚拟谐波电阻的负载特性治理配电网谐波电压。在虚拟谐波电阻策略下,不再需要检测特定支路的电流,而是利用传统 APF 已经采集的设备接入点电压信号提取谐波信息,控制设备吸收与各次谐波电压分量同相位的谐波电流,也即控制设备在谐波频段表现为纯电阻特性。

在 HADS 中,虚拟谐波电阻吸收的谐波有功功率是由谐波源用户消耗的基波有功功率转化而来的,也正是因此 HADS 能够使得谐波源用户消耗更多的电量(付出更多的电费)。HADS 吸收谐波有功后,能量不会耗散掉,而是以基波有功功率的形式返送回电网。

针对  $h$  次谐波电量,无论是否存在本地负荷/谐波源,接入主动防御设备的配电网单相戴维宁等效电路如图 2 所示,在此电路中,HADS 等效的虚拟谐波电阻  $R_h$  接入前、后,并网点(point of common coupling, PCC)  $h$  次谐波电压幅值分别为

$$U_{PCCh} = U_{sh} \quad (1)$$

$$U_{PCC_h} = \left| \frac{R_h}{Z_{sh} + R_h} \right| U_{sh} = \frac{R_h}{\sqrt{(R_s + R_h)^2 + X_{sh}^2}} U_{sh} \quad (2)$$

式中:  $U_{sh}$  为配电网中的  $h$  次谐波电压在接入点处的戴维宁等效电压;  $R_h$  为主动防御设备在  $h$  次谐波频段等效电阻;  $Z_{sh}, R_s, X_{sh}$  分别为配电网系统  $h$  次谐波等效阻抗以及其中的电阻和电抗分量。

对比式(1)和式(2),接入谐波电阻后能够有效降低PCC点谐波电压幅值。

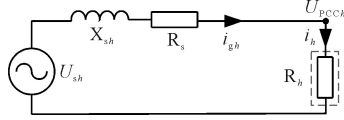


图2 配电网接入谐波阻抗的戴维宁等效电路

Fig.2 Thevenin equivalent circuit with harmonic impedance connected to distribution network

在图1中,忽略A,B,C间的短线路阻抗,B处接入谐波电阻后对A,B,C负荷的影响是相同的。当本地负荷B不产生谐波、而A,C产生谐波时,谐波电阻也能够对A,C非线性负荷造成的谐波进行治理;即使A,B,C间的线路阻抗不可忽略,在B处接入的谐波电阻也能吸收A,C非线性负

荷向电网注入的谐波电流,这就意味着谐波电阻具备区域谐波治理功能。此外,采用谐波电阻还有以下优点:1)现有的电网谐波惩罚机制难以激励用户主动参与到电力系统谐波治理中。谐波电阻的存在会使得谐波源用户发出的谐波电流在虚拟谐波电阻处消耗有功功率激励用户主动治理所产生的谐波;2)在电力系统接入谐波电阻后,可以增大系统阻尼,有效抑制谐振造成的危害;3)设备不需要检测负荷电流,减少了一组电流传感器,降低了设备硬件制造成本。

## 2 主动防御系统建模

本文提出的配电网谐波主动防御系统基于三相逆变桥,为了取得更好的谐波表现,采用NPC三电平结构,搭配电容支路串联无源阻尼的LCL型滤波器,如图3所示。其中,  $u_{dc1}, u_{dc2}, u_{nb}$  分别为直流侧上、下电容电压、中点电位;  $u_a, u_b, u_c$  为逆变器并网点电压;  $u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}$  为电网等效电动势;  $i_{1a}, i_{1b}, i_{1c}$  为逆变器桥侧输出电流;  $i_{2a}, i_{2b}, i_{2c}$  为逆变器网侧输出电流。

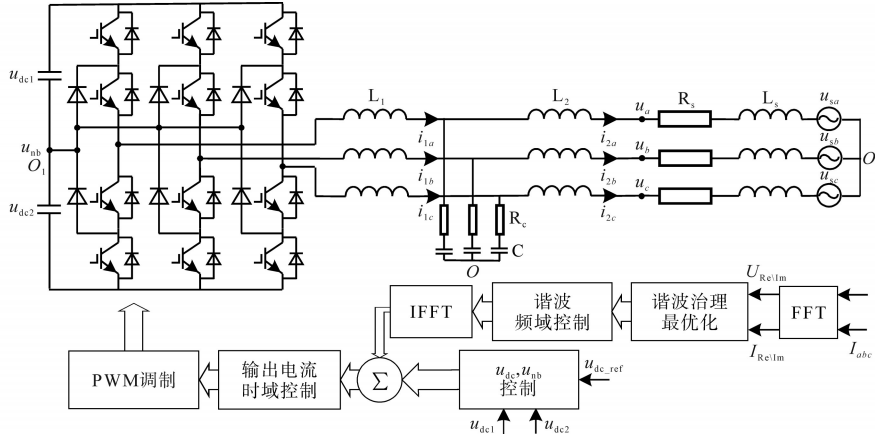


图3 谐波主动防御系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of HADS

由图3中拓扑约束和元件约束可建立主动防御系统  $dq$  同步旋转坐标系下的数学模型如下式:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} -(\frac{R_c}{L_1} + j\omega_g) & \frac{R_c}{L_1} & -\frac{1}{L_1} \\ \frac{R_c}{L_2} & -(\frac{R_c}{L_2} + j\omega_g) & \frac{1}{L_2} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{C} & -j\omega_g \end{pmatrix} \mathbf{x} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} K_{PWM} u_{rdq} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{L_2} \\ 0 \end{pmatrix} u_{gdq} \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{x} = [i_{1dq} \ i_{2dq} \ u_{Cdq}]^T = [i_{1d} + ji_{1q} \ i_{2d} + ji_{2q} \ u_{Cd} + ju_{Cq}]^T$$

式中:  $i_{1dq}, i_{2dq}, u_{Cdq}$  分别为桥侧电流、网侧电流、滤波电容电压;  $R_c$  为滤波电容串联电阻;  $\omega_g$  为同步旋转角速度;  $K_{PWM}$  为调制系数;  $u_{rdq}$  为调制波信号,  $u_{rdq} = u_{rd} + ju_{rq}$ ;  $u_{gdq}$  为电网电压扰动,  $u_{gdq} = u_{gd} + ju_{gq}$ 。

基于式(3)数学模型,设计了HADS的控制系统,如图4所示,其中包含直流侧电容电压、直流侧中点电位控制电压外环,基于FFT/IFFT(inverse fast Fourier transform)的频域各次谐波实部/虚部电流控制内环。



主动防御系统的控制策略与APF相似,主要区别在于指令电流的合成以及电流内环的控制方式。主动防御系统的指令电流包括谐波和基波成分,谐波控制过程中,首先采样PCC电压,通过FFT得到电压频域信息,也即各次谐波电压对应的频域复数序列,包含实部  $U_{hRe}$ 、虚部  $U_{hIm}$ 。将

各次电压实部、虚部与相应的目标虚拟电阻作用,即可得到各次谐波电流参考值的频域(实部、虚部)信息。在频域上做各次电流内环控制,采用PI控制即可实现无静差控制。各次电流内环控制得到的输出为频域复数序列,通过IFFT反变换到时域,作为调制波中的谐波分量。

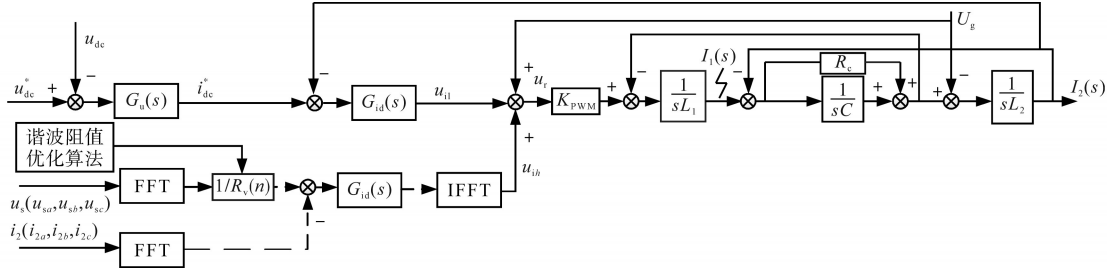


图4 谐波主动防御系统控制框图

Fig.4 Control block diagram of HADS

主动防御系统交流侧在谐波频段表现为电阻特性吸收谐波有功功率,会造成直流侧电容电压上升,因此在基波控制环节中,采用PI控制维持直流侧电容电压和中点电位平衡,输出的控制量作为基波电流参考值,将其与输出电流作比较后通过一个PI控制器,即可得到调制波中的基波分量。将上述调制波谐波分量与基波分量合并,加上前馈信号后即得到调制波信号。

### 3 主动防御系统虚拟谐波阻值调节策略

由式(2)可知,对各次谐波而言,主动防御系统等效虚拟谐波电阻阻值的大小直接影响配电网接入点谐波电压的治理效果。本文基于实际应用场景提出两种虚拟谐波电阻阻值调节策略,分别是:吸收谐波功率最大化调节策略和谐波电压治理效果最优化调节策略。前者适用于谐波污染不严重的常规情况,可以最大程度激励电网中产生谐波的用户主动治理谐波。后者适用于谐波污染较重、供电电能质量严重不达标场景,此时主动防御系统首要目标是降低谐波含量。

#### 3.1 吸收谐波功率最大化调节策略

针对特定次谐波频段,由图2相关分析已知配电网系统可以等效为一个单端口网络。根据单端口网络最大功率传输定理:单端口网络输出有功功率随外接电阻阻值增大呈现单峰曲线,且在外接电阻阻值  $R_{vh}$  等于单端口网络的系统阻抗  $\sqrt{R_s^2 + X_{sh}^2}$  时,外接电阻在该谐波频段下吸收的谐波有功功率最大。此时端口谐波电压和外接

电阻吸收的谐波有功功率如下式:

$$U_{pech} = \frac{\sqrt{R_s^2 + X_{sh}^2}}{\sqrt{(R_{vh} + R_s)^2 + X_{sh}^2}} \cdot U_{sh} \quad (4)$$

$$P_h = \frac{\sqrt{R_s^2 + X_{sh}^2}}{(R_{vh} + R_s)^2 + X_{sh}^2} \cdot U_{sh}^2 \quad (5)$$

如果能够控制HADS各次谐波电阻值跟踪接入电网的阻抗值,就能做到HADS吸收谐波有功功率最大化。在实际配电网中,电网的系统阻抗是未知的,但基于电阻与功率之间呈单峰曲线的特性,可以采用扰动观察法,实现对系统阻抗的实时追踪,使得控制主动防御系统的等效谐波电阻值保持在系统谐波阻抗值  $\sqrt{R_s^2 + X_{sh}^2}$  附近,达到吸收谐波功率最大的预期目的。

另外说明,由于实际电网中系统谐波电抗  $X_{sh}$  远大于系统电阻  $R_s$ ,在以下研究中设定系统阻抗为纯电感形式。在HADS控制系统中,由于电流参考值是由电压分量与虚拟阻值相除,故在控制系统中直接调节对象为虚拟谐波电导。

扰动观察法的原理是通过改变单峰曲线的横坐标大小(对应虚拟谐波电导  $G_h$ ),再测量单峰曲线纵坐标(对应  $P_h$ )的变化情况,判断单峰曲线峰值的方向,进而向峰值方向移动。应用于HADS的扰动观察法实现逻辑流程图如图5所示,其中  $P_h(k)$ 、 $U_h(k)$ 、 $I_h(k)$ 、 $G_h(k)$  分别为第  $k$  次计算过程中HADS吸收的  $h$  次谐波有功功率、并网点电压  $h$  次分量、输出电流  $h$  次分量、HADS控制系统中使用的  $h$  次虚拟谐波电导;  $\Delta G$  为设定的电导调节步长。

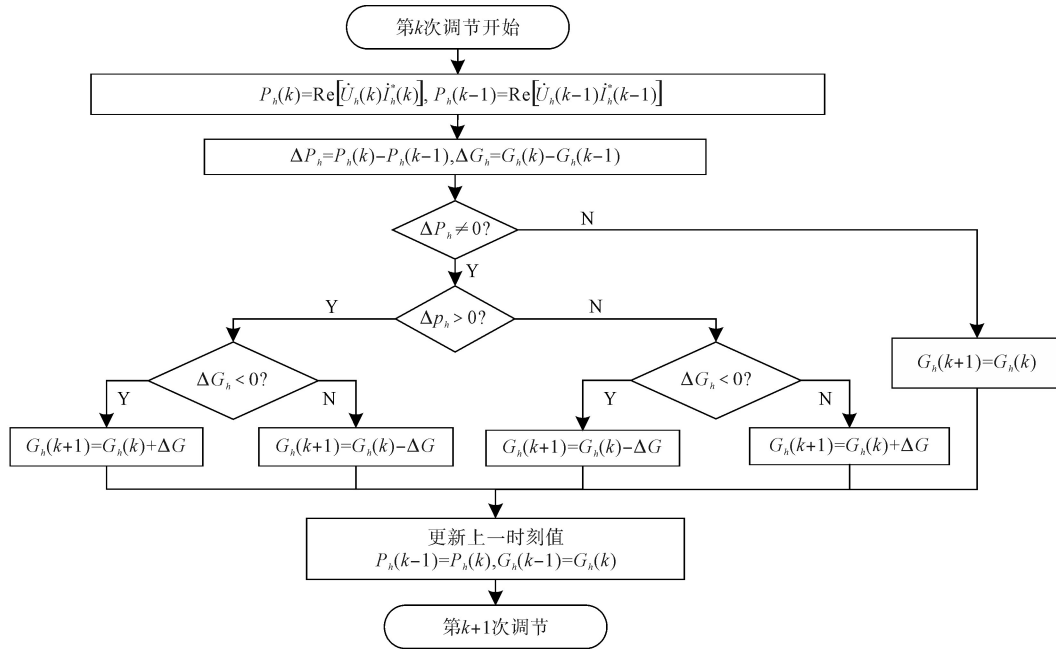


图5 扰动观察法流程图

Fig.5 Flow chart of disturbance observation method

扰动观察法实际应用中,定时施加扰动的的时间间隔取决于改变谐波电导值后系统输出电流达到稳定的时间。需要保证再次调节虚拟谐波电导值时,前一次因电导值变化造成的输出谐波电流变化已经稳定。每次调节的电导增量 $\Delta G_h$ 需要大到可以影响吸收的谐波有功功率 $P_h$ ,在满足此前提下, $\Delta G_h$ 越小,算法最终维持的电导值距离峰值点越近。

在PSCAD中搭建仿真模型,系统电感设 $L_s = 80 \mu\text{H}$ ,以5次谐波为例进行分析,系统电感对应5次导纳大小为7.96 S,电网5次谐波电压有效值设为 $10\sqrt{2} \text{ V}$ ,设置扰动步长0.2 S。设0.05 s做一次调节,经过3 s后,扰动观察法可以达到如图6所示的跟踪效果,跟踪到的5次虚拟电导值稳定在7.9 S附近,吸收谐波功率稳定在790 W

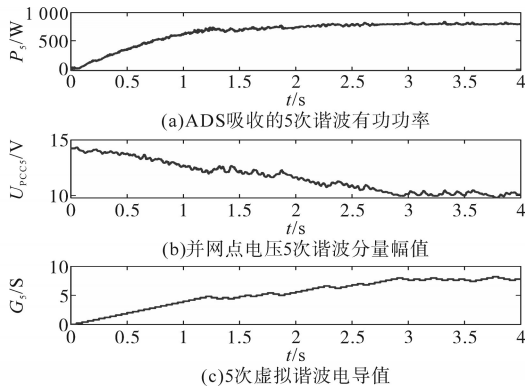


图6 谐波MPPT控制策略仿真效果

Fig.6 Simulation effect of harmonic MPPT control strategy

附近,符合式(4)、式(5)的理论值,实现了预期效果。

在实际电力系统中,系统阻抗会随系统运行工况发生变化,但由于优化算法会定时施加扰动,促使系统设置的电导值向图6a中曲线新峰值对应的电导值移动,保证优化结果的实时性,使得主动防御系统吸收谐波有功功率保持在峰值附近。

### 3.2 THD治理最优化调节策略

在电网谐波畸变严重、低于供电电能质量要求时,谐波主动防御系统的首要任务是降低电网电压总谐波畸变率THD。由PCC点电压决定式(式(2))可知,虚拟谐波电阻越小,治理效果越好,但需要设备输出的谐波电流越大。实际的情况是谐波治理设备容量是一定的,需要设计一种各次谐波电阻协同调节策略,使得在一定容量下,对PCC点电压的治理效果最好,也即电网电压THD下降最多。

电网电压THD定义为

$$\text{THD}_{U_{\text{PCC}}} = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_{\text{PCC}h}^2} = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{U_{sh}^2 R_h^2}{(R_s + R_h)^2 + X_s^2}} \quad (6)$$

$h$ 次谐波输出电流为

$$I_h = \frac{U_{sh}}{\sqrt{(R_s + R_h)^2 + X_s^2}} \quad (7)$$

则有下式:

$$\begin{aligned} \text{THD}_{U_{\text{PCC}}} &= \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2 R_h^2} \\ &= \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_{sh}^2 - I_h^2 X_{sh}^2 - 2R_s I_h^2 \sqrt{\left(\frac{U_{sh}}{I_h}\right)^2 - X_{sh}^2 + R_s^2}} \end{aligned} \quad (8)$$

对于谐波而言,系统电抗 $X_s$ 往往远大于系统电阻 $R_s$ ,为了简化算法计算复杂度,式(8)可简化为

$$\text{THD}_{U_{\text{PCC}}} = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_{sh}^2 - I_h^2 X_s^2)} \quad (9)$$

此外,设备总输出电流需要满足容量约束条件:

$$\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} < I_N \quad (10)$$

式中: $I_N$ 为设备额定输出电流。

对各次谐波电流,也有约束条件:

$$I_h \leq \frac{U_{sh}}{\sqrt{R_s^2 + X_{sh}^2}} \quad (11)$$

引入最速下降法进行谐波阻值优化算法设计,其算法流程如图7所示。

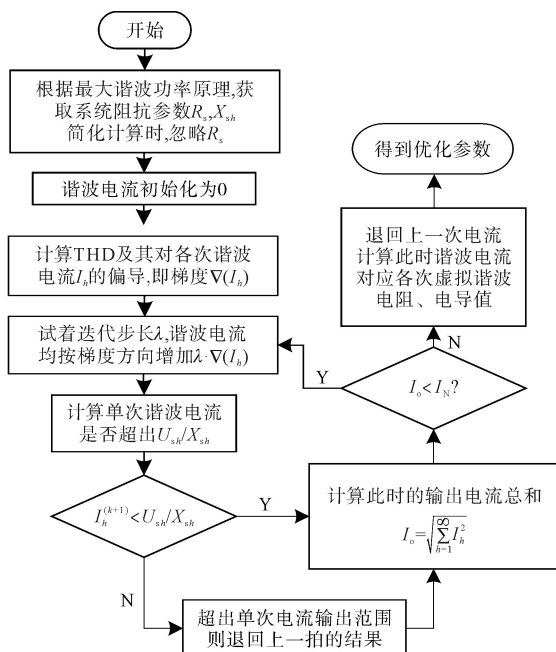


图7 THD治理最优调节策略流程图

Fig.7 Flow chart of optimal regulation strategy for THD

在Matlab中进行优化算法仿真,系统参数如下:基波电压幅值为220 V,3次、5次、7次、11次谐波电压幅值均为10 V;系统阻抗中的电阻分量为0 Ω, $h$ 次谐波对应的 $h$ 次谐波电抗分量为 $h \cdot 0.22 \Omega$ ;设备额定输出电流(也即补偿容量) $I_N$ 为10 A。

在此参数下,按图7算法流程进行优化的过程如图8所示。

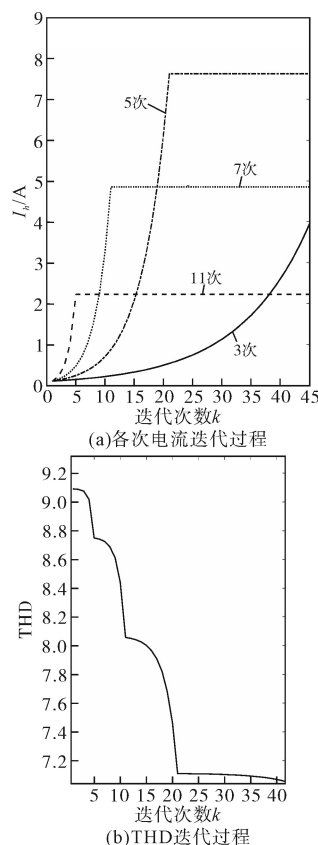


图8 THD治理最优调节过程

Fig.8 Process of optimal regulation strategy for THD

在当前系统参数下,具有10 A谐波补偿容量的设备可以将系统THD由9.09%下降至7.01%,此时输出的各次谐波电流和对应设置的虚拟谐波电阻、电导如表1所示。

表1 算法优化结果

Tab.1 Algorithm optimization results

| 谐波次数 | $I_h/\text{A}$ | $R_h/\Omega$ | $G_h/\text{S}$ |
|------|----------------|--------------|----------------|
| 3    | 3.946 5        | 2.446        | 0.408 8        |
| 5    | 7.628 4        | 0.713        | 1.402 4        |
| 7    | 4.852 0        | 1.370        | 0.730 1        |
| 11   | 2.222 6        | 3.793        | 0.263 6        |

根据此算法优化结果设置谐波电阻值,能够在设备谐波补偿容量一定时取得最好的谐波治理效果。

## 4 实验室功能验证

为了验证所提HADS的有效性,在实验室中,搭建了一个由FPGA(field programmable gate array)、双DSP(digital signal processor)作为主控

系统的虚拟谐波电阻型HADS实验平台。实验平台还包括一台电能质量扰动发生器,作为可控制谐波含量的电网侧,电网阻抗使用电抗器代替,其基波电抗为 $0.32\ \Omega$ ,对应5次谐波导纳值为 $0.625\ \text{S}$ 。采用日置3196电能质量分析仪作为实验数据记录仪器。实验平台如图9所示,HADS设备参数为:补偿容量 $100\ \text{A}$ ,补偿范围 $100\sim 2\ 500\ \text{Hz}$ ,开关频率 $20\ \text{kHz}$ ,采样频率 $25.6\ \text{kHz}$ ,直流侧电压 $700\ \text{V}$ ,滤波电感 $L_1=160\ \mu\text{H}$ , $L_2=40\ \mu\text{H}$ ,滤波电容 $C=30\ \mu\text{F}$ ,电容支路无源阻尼 $R_c=0.3\ \Omega$ ,交流侧电压 $380\ \text{V}$ 。

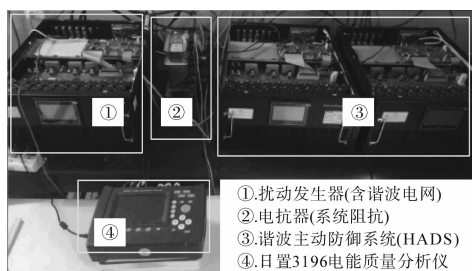


图9 HADS实验平台

Fig.9 Experimental platform of HADS

以治理5次谐波为例,谐波源设置为基波电压有效值 $220\ \text{V}$ ,5次谐波电压有效值 $10\ \text{V}$ 。将虚拟谐波电阻型HADS的控制程序烧写入HADS主控芯片,接好电路及电能质量分析仪。

按照谐波功率最大化策略运行,记录并网点电压波形如图10所示,5次谐波功率、电压幅值变化过程如图11所示。可以看到,电网电压5次谐波分量由 $11.1\ \text{V}$ 下降到 $7.4\ \text{V}$ ,吸收谐波功率稳定在 $34\ \text{W}$ 附近。此时设备显示5次电导值稳定在 $0.62\ \text{S}$ ,符合式(4)、式(5)理论分析,证明了虚拟谐波电阻型HADS的谐波治理有效性以及吸收谐波功率最大化控制策略的可行性。

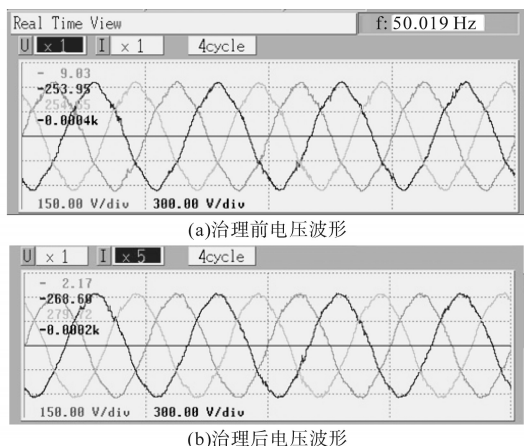


图10 HADS治理前、后电压波形图

Fig.10 Voltage waveforms before and after treatment

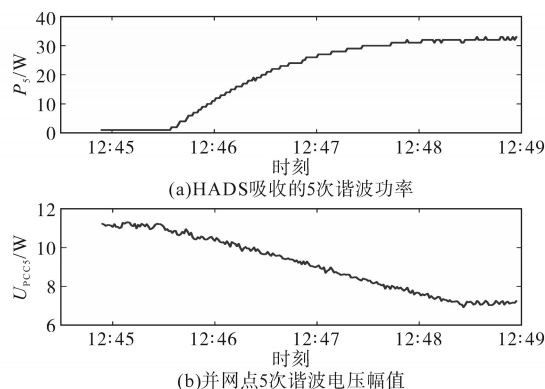


图11 HADS以谐波MPPT策略运行的效果

Fig.11 Effect of harmonic MPPT strategy for HADS

## 5 示范工程应用

为了进一步证明HADS的可靠性,在江苏省盐城市大丰区通商变电站安装了HADS进行示范应用。HADS设备采用机柜安装,由两台容量为 $60\ \text{kW}$ 的模块化HADS并联构成,连接于变电站低压侧 $380\ \text{V}$ 系统,如图12所示。HADS设备安装至今已安全稳定运行 $2\ \text{a}$ ,谐波治理效果良好,如图13所示。

在示范工程现场检测到由本地谐波源和非本地谐波源共同作用产生的背景谐波电压主要包含5次、7次、11次、13次、17次谐波。设备启动前、后系统谐波电压情况如表2所示,THD由原始的 $4.95\%$ 降至 $1.31\%$ ,记录此数据时的各次谐波电导值均为手动设置。



图12 示范工程现场

Fig.12 Demonstration project site

表2 示范工程治理效果

Tab.2 Suppressing effect of demonstration project

|     | 谐波电压/V |      |      |      |      |
|-----|--------|------|------|------|------|
|     | 5次     | 7次   | 11次  | 13次  | 17次  |
| 治理前 | 2.58   | 3.33 | 6.12 | 6.69 | 2.32 |
| 治理后 | 0.97   | 0.73 | 0.15 | 0.28 | 0.61 |



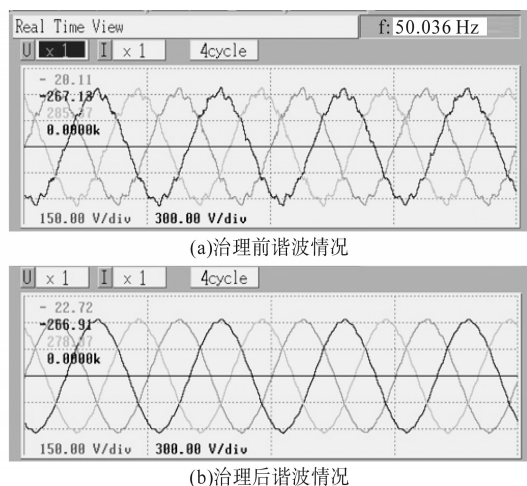


图13 示范工程现场及其治理效果

Fig.13 Demonstration project site and its suppressing effect

实验和示范工程应用证明,在目前谐波源趋于分散化的背景下,HADS治理谐波的方案值得进一步推广应用。

## 6 结论

本文提出了一种新型的基于虚拟谐波电阻的配电网谐波治理设备——谐波主动防御系统,详细分析了谐波主动防御系统的功能原理,并建立了仿真模型,设计了控制系统,并提出基于最大谐波功率点跟踪和谐波治理效果最优化的两种控制策略。理论、实验和示范工程证明,基于虚拟谐波电阻的原理治理系统谐波电压的方式在新型电力系统下作为区域谐波治理手段具有较好效果,值得进一步研究。

### 参考文献

- [1] 文云峰,杨伟峰,汪荣华,等.构建100%可再生能源电力系统述评与展望[J].中国电机工程学报,2020,40(6):1843-1856.  
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, WANG Ronghua, et al. Review and prospect of toward 100% renewable energy power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1843-1856.
- [2] 高庆忠,赵琰,穆昱壮,等.高渗透率可再生能源集成电力系统灵活性优化调度[J].电网技术,2020,44(10):3761-3768.  
GAO Qingzhong, ZHAO Yan, MU Yuzhuang, et al. Flexibility optimal dispatch of high-penetration renewable energy integrated power systems[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3761-3768.
- [3] 罗安,吴传平,彭双剑.谐波治理技术现状及其发展[J].大功率变流技术,2011(6):1-5.  
LUO An, WU Chuanping, PENG Shuangjian. State of harmonic compensation technology and its development[J]. High Power Converter Technology, 2011(6): 1-5.
- [4] 王林,黄辉,王先为,等.微网中多分布式变流器耦合分析及PCC电压稳定控制[J].电气传动,2018,48(10):53-58.  
WANG Lin, HUANG Hui, WANG Xianwei, et al. Coupling analysis and PCC voltage stability control of multi-inverter system in microgrid[J]. Electric Drive, 2018, 48(10): 53-58.
- [5] 周京华,闫天乐,郭磊轩,等.微电网背景下电能质量分析与治理[J].电气传动,2022,52(18):3-9,16.  
ZHOU Jinghua, YAN Tianle, GUO Leixuan, et al. Analysis and treatment of power quality in the background of microgrid[J]. Electric Drive, 2022, 52(18): 3-9, 16.
- [6] 李强,李刚,贺艺,等.面向智能电网的电能质量分析装置[J].电气传动,2020,50(12):99-103.  
LI Qiang, LI Gang, HE Yi, et al. Power quality analysis device for intelligent power grid[J]. Electric Drive, 2020, 50(12): 99-103.
- [7] 肖湘宁,廖坤玉,唐松浩,等.配电网电力电子化的发展和超次谐波新问题[J].电工技术学报,2018,33(4):707-720.  
XIAO Xiangning, LIAO Kunyu, TANG Songhao, et al. Development of power-electronized distribution grids and the new supra-harmonics issues[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 707-720.
- [8] 孙广宇,李永丽,靳伟,等.基于三相多功能逆变器的微电网电能质量综合治理策略[J].电网技术,2019,43(4):1211-1219.  
SUN Guangyu, LI Yongli, JIN Wei, et al. A comprehensive power quality control strategy for microgrid based on three-phase multi-function inverters[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1211-1219.
- [9] 康鹏,郭伟,黄伟钢,等.区域电网电能质量问题及治理关键技术综述[J].电测与仪表,2020,57(24):1-12.  
KANG Peng, GUO Wei, HUANG Weigang, et al. Review of the power quality problem and key treatment technology of regional power grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(24): 1-12.
- [10] AKAGI H. New trends in active filters for power conditioning[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1996, 32(6): 1312-1322.
- [11] 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 Transactions on Industry Applications, 1999, 35(3): 638-645.
- [12] WADA K, FUJITA H, AKAGI H. Considerations of a shunt active filter based on voltage detection for installation on a long distribution feeder[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(4): 1123-1130.
- [13] 凌毓畅.基于自抗扰的虚拟谐波电阻型光伏逆变器研究[D].广州:华南理工大学,2018.  
LING Yuchang. Research on virtual-harmonic-resistance-type photovoltaic inverter based on ADRC[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.

收稿日期:2022-03-01

修改稿日期:2022-03-16