

# 基于谱序列变换的实验室用电谐波深度控制研究

郑泽<sup>1</sup>, 陈彩微<sup>1</sup>, 陈小曼<sup>2</sup>

(1. 浙江东方职业技术学院 数工学院, 浙江 温州 325600; 2. 温州大学 商学院, 浙江 温州 325600)

**摘要:** 实验室用电谐波参数取值范围难以确定, 导致实验室用电谐波深度控制质量下降, 以解决该问题作为研究目标, 设计基于谱序列变换的实验室用电谐波深度控制方法; 根据谱序列变换原则估算实验室用电谐波参数取值范围; 根据估算结果建立多电平逆变器, 提取 DFT、DSC 谐波并分析其波动特性, 提取实验室用电谐波特征; 设计谐波控制器架构, 通过计算死区补偿向量与控制参数的方式, 实现对用电谐波的深度控制; 对比实验结果表明, 所设计方法可将电流谐波控制在 6.8~12.4 A 的范围之内, 可将电压谐波控制在 180~220 V 的范围之内, 电压与电流谐波畸变率始终处于较低的水平, 能够快速使实验室电力系统恢复正常, 大幅提升电量谐波的稳定性, 解决电力损耗问题。

**关键词:** 谱序列变换; 实验室; 用电谐波; 深度控制; 多电平逆变器; 死区补偿

## Research on Harmonic Depth Control of Laboratory Power Supply Based on Spectrum Sequence Transformation

ZHENG Ze<sup>1</sup>, CHEN Caiwei<sup>1</sup>, CHEN Xiaoman<sup>2</sup>

(1. School of Mathematics and Engineering, Zhejiang Dongfang Polytechnic, Wenzhou 325600, China;

2. Business College, Wenzhou University, Wenzhou 325600, China)

**Abstract:** It is difficult to determine the value range of the laboratory power harmonic parameters, which leads to the decline of the quality of the laboratory power harmonic depth control. In order to solve this problem as a research objective, a laboratory power harmonic depth control method based on the spectral sequence transformation is designed. According to the principle of the spectral sequence transformation, the harmonic parameter range of laboratory electricity is estimated. According to the estimation results, a multilevel inverter is established to extract the harmonics of DFT and DSC, analyze their fluctuation characteristics, and extract the harmonic characteristics of laboratory electricity. The harmonic controller architecture is designed to realize the deep control of power harmonics by calculating the dead zone compensation vector and control parameters. The comparative experimental results show that the designed method can control current harmonics within the range of 6.8~12.4 A, and voltage harmonics within the range of 180~220 V. The distortion rate of voltage and current harmonics is always at a low level, which can quickly restore the laboratory power system to normal, greatly improve the stability of electricity harmonics, and solve the problem of power loss.

**Keywords:** spectral sequence transformation; laboratory; power harmonic; depth control; multilevel inverter; dead zone compensation

## 0 引言

谐波是一种频率高于基波的电信号, 可以由电力电子设备, 电弧炉, 照明负载等产生。当这些谐波信号进入电网时, 它们会造成电能损耗和设备故障, 甚至会对电网稳定性和电力质量产生严重影响。为了减少谐波对电力系统的不良影响, 许多国家都出台了相关的法规和标准, 要求电力设备的谐波排放应该符合一定的限制要求。原因在于电力谐波的存在会导致电压和电流发生变化, 将会产生许多不可控的灾害, 影响设备的使用安全。首先, 谐波会导致电力系统中相关设备元件运行效率的持续下降, 从而使变压器、电机等电损坏; 其次, 谐波会诱发电气设备的异常工作状态, 使电机设备在旋转磁场作用下表现出共振行

为; 此外, 谐波还有可能增大电气仪表的测量误差, 这也是导致整流型继电器出现错误动作的主要原因<sup>[1]</sup>。特殊情况下, 谐波还会通过传导耦合或是电磁感应的方式对电网终端设备造成影响, 从而使其失去稳定供电的能力。更为严重的是, 并联型电容器作为主要的无功补偿设备, 在谐波影响下会出现电容阻抗大幅减小、电感阻抗大幅增加的情况, 这就增大了串、并联谐振行为的发生概率。当谐振行为达到一定强度水平后, 电容器加速老化, 严重情况下甚至有可能出现过热烧毁<sup>[2]</sup>。因此, 有效抑制谐波, 使其呈现出稳定的周期性变化规律, 才能够保障设备的安全稳定运行。

实验室也是进行新技术研发和测试的重要地方, 因此

收稿日期: 2023-01-31; 修回日期: 2023-04-24。

基金项目: 浙江东方职业技术学院院级重点课题(DF2018ZD02); 浙江东方职业技术学院院级课题(DF2022CJRH05)。

作者简介: 郑泽(1981-), 男, 硕士研究生, 实验师。

引用格式: 郑泽, 陈彩微, 陈小曼. 基于谱序列变换的实验室用电谐波深度控制研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(9): 109-115.

实验室用电谐波深度控制的研究备受关注。实验室用电谐波深度控制的研究还涉及以下几个方面。首先,由于实验室内有许多电子设备和电源,这些设备之间会相互干扰,产生谐波信号,造成抑制效应,这会对实验结果和测试的可靠性产生不良影响。其次,谐波波形的波动特性非常复杂,不同频率的谐波波形的幅度和相位的变化规律不同,这使得实验室用电谐波深度控制变得更加困难。然后,实验室用电谐波深度控制需要高精度的控制方法,可以确保所控制的电力设备排放的谐波深度在一定范围内。实验室是进行科学实验的场所,一些高精度实验对于供应电源稳定性的要求相对较高,为更好完成这些实验,对电量谐波进行有效控制成为了一项亟待解决的应用难题。基于电场耦合的谐波检测与控制方法主要是根据电场耦合原理,测得大量的电压谐波信号,又联合 Hanning 窗算法与快速傅里叶变换思想,对所得信号进行处理,并推导电量谐波的数值稳定区间,以此实现谐波的稳定控制<sup>[3]</sup>。基于感应电能供电技术的谐波控制方法根据谱投影梯度算法原则重构原始谐波信号,通过插值修正处理的方式计算电量频谱发生异常的可能性,在确保避开所有可能区间的情况下,定义电量谐波的数值稳定区间,以此实现谐波的稳定控制<sup>[4]</sup>。然而上述两种方法难以确定实验室用电谐波参数取值范围,只能对电流谐波、电压谐波进行局部稳定,导致控制质量下降。为解决上述问题,提出基于谱序列变换的实验室用电谐波深度控制方法。

## 1 基于谱序列变换的用电谐波分析

### 1.1 谱序列变换原则

谱序列变换就是按照信号谱规律,对电量谐波进行整合处理,要求处理后谐波信号在每一波动周期内的波峰与波谷值都具有高度统一性<sup>[5-6]</sup>。所谓变换可以理解为依照统一性原则所进行的变动处理,对于波峰值、波谷值较大的谐波区域而言,可以通过适当延长频率周期的方式,使超出额定范围的参数指标回归正常值范围,从而使得谐波谱的稳定性得到较好保障;对于波峰值、波谷值相对较为接近的区域而言,由于其频率周期初始赋值相对较小,若再进行缩小处理,有可能造成谐波参量出现相互覆盖的情况,故而可以通过适当抽取谐波参量的方式,来拉长一个谐波信号的单位传输周期,从而实现了对信号波动幅度的有效控制。对于波峰值、波谷值的求解满足如下表达式:

$$\begin{cases} e_1 = \frac{R_1}{2} [\alpha_1 \cdot \delta_1 \hat{R}^{(i-1)^2}] \\ e_2 = \frac{2 \times (\alpha_2 \cdot R_2 \cdot \delta_2)}{\hat{R}^{(i-1)^2}} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $e_1$  表示电量谐波的波峰值,  $e_2$  表示波谷值,  $R_1$  表示峰值条件下的谱序列参数,  $R_2$  表示谷值条件下的谱序列参数,  $\hat{R}$  表示常性变换系数,  $i$  表示电量谐波的传输频率,  $\alpha_1$ 、 $\delta_1$  分别表示峰值条件下的限定参数和正常回归值,  $\alpha_2$ 、 $\delta_2$  分别表示谷值条件下的限定参数和正常回归值。

设  $\beta$  表示电量谐波振动系数,  $\chi_1$  表示峰值振荡向量,  $q_1$  表

示峰值振荡周期,  $\chi_2$  表示谷值振荡向量,  $q_2$  表示谷值振荡周期, 联立公式 (1), 推导电量谐波的谱序列变换表达式为:

$$E = \left| \frac{e_1}{e_2} \right|^2 \cdot \beta \left( 1 - \left| \frac{\chi_1 \cdot q_1}{\chi_2 \cdot q_2} \right| \right) \quad (2)$$

公式 (2) 所得数值等于“1”的情况下,表示峰、谷值频率完全相等,谱序列变换原则能够准确描述出用电谐波的变化规律,但实际运算过程中,很难出现理想情况,因此只要计算结果与自然数“1”较为接近,就认为用电谐波变化规律符合谱序列变换原则。

### 1.2 谐波参数估算

谐波参数估算就是在谱序列变换原则的基础上,根据电量谐波曲线的走向形式,对未来可能出现的指标参量进行预测。通常情况下,估算结果的准确性将直接影响实验室主机对于用电谐波的控制效果,因此准确估算谐波参数,是利用谱序列变换原则分析用电谐波的必要环节<sup>[7-8]</sup>。谱序列变换原则规定谐波就是具有周期性变化特征的信号参量,在单位信号周期内,其波动行为能力虽然有限,但由于相邻波段能够完整拼接在一起,所以谐波参数具有良好的延续性。估算用电谐波参数,首先要求解谱序列变换原则表达式的导数结果,计算式如下。

首先要求解谱序列变换表达式的导数结果,计算式如下:

$$E' = \int_{-\infty}^{+\infty} E \quad (3)$$

由于实验室用电谐波向量的取值不具有明确方向性,所以在求解谱序列变换表达式的导数结果时,应在  $(-\infty, +\infty)$  区间内进行运算。在实际应用过程中,电度表只能测得正向传输情况下的电压与电流数值,所以公式 (2)、公式 (3) 的最终计算结果还必须满足如下表达式。

$$E, E' \in [1, +\infty) \quad (4)$$

电度标示数为“零”,表示实验室电力网络中不存在电量传输行为,即当前情况下,用电谐波不具备传输能力,所以谱序列变换原则表达式及其导数表达式的最小取值结果只能等于“1”;当谱序列变换表达式求解结果趋近于正无穷时,用电谐波在一个行为周期内的传输能力较强,当前情况下,波导向量、传输波动系数的实时取值有可能不匹配,因此为实现对谐波参数的准确估算这一目标,需要控制所涉及参数向量的取值,使得谱序列变换表达式的实际计算结果尽量保持在中位区间之内。

设  $r'$  表示基于谱序列变换原则的电量谐波导向量,  $r''$  表示基于谱序列变换原则导数表达式的电量谐波导向量,  $\epsilon$  表示估算权限,  $\tilde{\epsilon}$  表示电量谐波的传输波动系数,  $u$  表示电量谐波在单位周期内的维稳值参数,联立公式 (2)、公式 (3), 可将谐波参数取值范围估算结果表示为:

$$W = \frac{r'E}{\epsilon} + \sum_{\epsilon=1}^{+\infty} \frac{r''E'}{\epsilon + u} \quad (5)$$

如果公式 (5) 计算结果的波动性较大,则表示实验室用电谐波在该传输周期内的波动较为明显。

## 2 实验室用电谐波深度控制

根据谱序列变换原则, 调节多电平逆变器结构, 再利用谐波特性分析与数字迭代计算结果, 推导完整的数学模型, 从而实现对实验室用电谐波特征的提取。

### 2.1 多电平逆变器

逆变器是负责把直流电能转换为交流电能的装置, 由滤波电路、逻辑控制元件、逆变桥装置共同组成。直流电能长期存储于蓄电池、电池等电容元件之中, 故其传输能力相对有限, 在实验室用电环境中, 单纯的直流电无法满足供应所有实验元件的需求, 所以为维持用电谐波的稳定性, 需借助逆变器设备实现对电能信号的转换<sup>[9]</sup>。相较于其他类型的变电处理设备, 逆变器元件对于谐波电量信号的适应性更强, 即便是在谐波信号传输深度不断变化的情况下, 该元件结构也可以确保电信号波动行为在单位传输周期内保持较为稳定的数据状态。为适应谱序列变换原则, 采用多电平逆变器对电能信号进行转换处理, 定频定压状态下的电能信号经过多电平逆变器元件的多次处理, 转换成调频调压状态下的交流电信号, 以供实验设备元件的调取与利用。完整的多电平逆变器结构如图 1 所示。

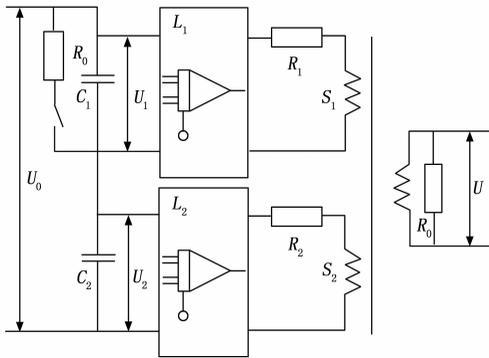


图 1 多电平逆变器结构图

$U_0$  端作为直流电能输入端, 其电压水平等于  $U_1$ 、 $U_2$  之和;  $U$  端作为交流电能输出端, 其电压水平理论上应与  $U_0$  端数值相等, 但由于电量谐波在传输过程中总会出现一定程度的损耗, 所以  $U$  端的实际电压数值小于  $U_0$  端<sup>[10]</sup>。 $L_1$ 、 $L_2$  是两个完全相同的逆变装置, 可以感知实验室用电网络中的电量谐波传输情况, 并可以在不影响电信号传输行为的同时, 对  $S_1$  端、 $S_2$  端负载电压数值进行调节。

### 2.2 谐波波动特征提取

按照谱序列变换原则来划分, 可将实验室用电谐波分为 DFT 谐波、DSC 谐波两类, 为实现对谐波信号的精准控制, 应对两类谐波的传输特性进行细致分析。

#### 2.2.1 DFT 谐波

DFT 谐波是指基波频率不变, 但振波频率始终来回波动的谐波信号。随着实验室用电量的增大, DFT 谐波的出现次数也会不断增大, 当每一振动周期内都存在至少一个完整的 DFT 谐波振动波形, 因此实验室用电谐波也是 DFT 谐波主导的波动传输信号<sup>[11-12]</sup>。一个振动周期内, DFT 谐

波的存在数量越多, 就表示电量信号的传输波动性越强, 即便是在基波频率不变的情况下, 该类型电信号的谐波传输行为也很难保持长期稳定状态。对于 DFT 谐波振动特征提取结果见公式 (6)。

$$P_1 = \frac{2}{|\Delta T|} (1 + W^{-\gamma}) \frac{1}{U - \varphi I} \quad (6)$$

其中:  $\Delta T$  表示实验室用电谐波的单位振动周期, 其取值结果受到输入电压数值水平的影响,  $U$  表示交流电压数值,  $I$  表示电流数值,  $\varphi$  表示传输波动性系数,  $\gamma$  表示谐波振动向量。由于 DFT 谐波在传输过程中具有明显的对称性, 所以单位振动周期内, 只存在一个完整 DFT 谐波振动波形的可能性相对较小。

#### 2.2.2 DSC 谐波

DSC 谐波是指基波频率来回波动, 但振波频率保持不变的谐波信号。相较于 DFT 谐波, DSC 谐波的存在具有普遍性, 如果连续两个振动周期内, 都不存在 DFT 谐波, 那么实验室用电谐波就成为了由 DSC 谐波主导的波动传输信号。一个振动周期内, DSC 谐波的存在数量必须是 2 的倍数。简单来说, 就是如果一个实验室用电周期内存在 DSC 谐波, 那么该波动信号中 DSC 谐波的最小取值结果为  $4^{[13-14]}$ 。设  $U'$  表示存在 DSC 谐波时基于谱序列变换原则所测得的交流电压数值,  $I'$  表示当前测量情况下的电流数值,  $\varphi'$  表示当前情况下的谐波传输深度,  $\gamma'$  表示与 DSC 谐波匹配的振动向量。在上述物理量的支持下, DSC 谐波特征提取结果为:

$$P_2 = \frac{4}{|\Delta T|} \cdot \left( \frac{U' - \varphi' I'}{1 + W^{-\gamma'}} \right)^4 \quad (7)$$

如果一个实验室用电周期内, 同时存在 DFT 谐波与 DSC 谐波, 且两者之间并不存在明显干扰关系, 那么在控制谐波传输深度时, 可对两类谐波特性进行分别定义, 再按照谱序列变换原则, 描述剩余波段内谐波信号的传输情况; 若 DFT 谐波、DSC 谐波之间存在相互干扰关系, 就表示一个用电周期内, 谐波信号的作用行为较为复杂, 在控制谐波传输深度时, 只能选择几个特征谐波点参量作为实际研究对象, 以此提取谐波波动特性<sup>[15-16]</sup>。

### 2.3 谐波深度控制

对于实验室用电谐波的深度控制, 还需在控制器架构体系的基础上, 分别求解死区补偿向量与控制参数, 并根据最终计算结果, 以此实现用电谐波的深度控制。

为了更好地应用谐波的传输特性, 在控制其波动行为时, 还需按照控制器架构的连接形式, 分析谐波信号在每一波动周期内的传输特征<sup>[17-18]</sup>。从广义角度来看, DFT 谐波、DSC 谐波都属于常见的谐波信号, 在传输过程中, 为使这些信号样本的相角补偿能力保持一致, 信号处理器、信号放大器、信号聚合器必须同时进入工作状态, 一方面统一谐波信号的传输波频, 另一方面根据电压、电流等电量指标的数值水平, 判断谐波信号的延时与增益情况, 以便于控制器设备能够对波动向量进行有效控制<sup>[19-20]</sup>。此外,

校正单元作为控制器架构中唯一具有双向协调能力设备元件，可以精准感知谐波信号的当前波动特性，由于 DFT 谐波、DSC 谐波在同一传输周期内具有不同的波动特性，所以校正单元在实施协调处理之前，首先会对信号样本种类进行区分。对于校正单元而言，广义谐波信号、相角补偿机制同时带来了延时与增益控制效果，而这些作用行为则是保证控制器架构在谐波波长调节方面处理效果的主要原因。具体的控制器架构框图结构如图 2 所示。

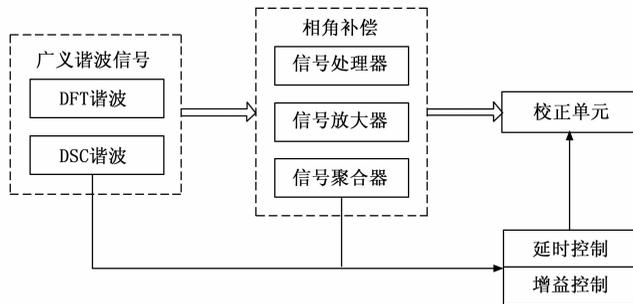


图 2 控制器架构框图

如果 DFT 谐波、DSC 谐波的传输波长相等，那么规定当前用电谐波信号的相角水平相同，校正单元可直接对这些信号参量进行处理。

由死区引起的谐波信号与误差电压及感应电流的传输方向有关。当误差电压水平较低时，感应电流由高电量端向着低电量端传输，死区输出谐波分量所能达到的传输深度较浅<sup>[21-22]</sup>。而死区输出谐波分量的数值水平极难计算，因此为有效控制实验室用电谐波的传输深度，应在开始计算之前，统计死区补偿向量的数值情况，结果如下：

$$L = 2 \left( \frac{\bar{j}(P_1 + P_2)}{|x_v - x_\omega|} \right)^2 \quad (8)$$

其中： $\nu, \omega$  表示两个随机选取的谐波电量参数， $x_v$  表示  $\nu$  下的谐波电感， $x_\omega$  表示  $\omega$  下的谐波电感， $\bar{j}$  表示死区范围划定标准。若不存在特殊要求，规定谐波信号的单位传输周期内，最多只能存在一个符合谱序列变换原则判断标准的死区空间。

控制参数也叫控制系数，是实现实验室用电谐波深度控制所必须考虑的指标参量，其取值结果受到死区补偿向量参考范围的直接影响。如果死区补偿向量的求解符合控制器架构连接形式，那么控制参数计算结果也一定与该框架结构相符合<sup>[23-24]</sup>。设  $\bar{Z}$  表示谐波信号补偿参数， $\hat{g}$  表示信号突变参数， $C'$  表示信号传输范围的标准划定条件， $m_{\max}$  表示谐波控制向量的最大取值， $m_{\min}$  表示谐波控制向量的最小取值。在上述物理量的支持下，联立公式 (10)，推导控制参数计算式如下：

$$b = \frac{1}{2} \cdot \frac{L}{\bar{Z}} \cdot \frac{C'}{\hat{g}^2} \cdot (m_{\max} - m_{\min}) \quad (9)$$

为保证对于实验室用电谐波深度的控制效果，还要求控制参数的取值必须属于  $(0, 1]$  的数值区间。

实验室用电谐波深度控制模型是遵循谱序列变换原则

所建立的数学计算表达式，能够清晰描述出实验室用电谐波在单位波动周期内的波形规律，可以为谐波信号的精准控制提供参考依据。在确保数字迭代条件保持恒定的情况下，对于实验室用电谐波深度控制模型的求解应注意如下两方面问题。

1) 所选谐波点必须能够描述出谐波行为的波动性特征；

2) 所选节点对象应处于谐波行为的上升周期之内，且同一谐波周期内，不得对特征参量进行重复取值。由于数字迭代关系的成立，要求所应用谐波信号必须来自同一个波动周期，所以为保持实验室用电谐波深度控制模型与数字迭代关系表达式之间的对应关系，应在该波动周期内进行再次取样。满足谱序列变换原则的实验室用电谐波深度控制模型表达式为：

$$F = \sum_{\kappa=1}^{+\infty} b \cdot \frac{k \cdot |1/\epsilon^{-1}|^{\mu} g}{\bar{h}^2} \cdot \left. \sum_{\mu=1}^{+\infty} \left| \frac{(h_{\min} - 1)}{h_{\max}} \right|^2 \right|_{\mu \neq \kappa} \quad (10)$$

式中， $\mu, \kappa$  表示两个不相等的参考项指标， $k$  表示理论推导系数， $\bar{h}$  表示谐波信号的方向性传输向量， $\epsilon$  表示惯常值指标， $g$  表示合理迭代参数， $h_{\max}$  与  $h_{\min}$  分别表示用电谐波波形向量在单位波动周期内的最大和最小取值。

### 3 实例分析

为了检验基于谱序列变换的实验室用电谐波深度控制方法、基于电场耦合法的谐波检测与控制方法、基于感应电能供电技术的谐波控制方法的实用差异性，设计如下对比实验，根据电流谐波、电压谐波的实验数值情况，分析所应用方法的有效性。

#### 3.1 实验步骤

本次实验的具体实验流程如下：

- 1) 搭建实验环境，按需闭合相关控制开关，确保实验元件的稳定运行；
- 2) 将基于谱序列变换的实验室用电谐波深度控制方法作为实验组，利用该方法控制实验电路，记录在既定实验时间内，实验组电流谐波、电压谐波的具体数值情况；
- 3) 闭合控制开关，使实验元件恢复至初始状态；
- 4) 将基于电场耦合法的谐波检测与控制方法作为对照 1 组，利用该方法控制实验电路，记录在既定实验时间内，电流谐波、电压谐波的具体数值；
- 5) 再次闭合控制开关，使实验元件恢复至初始状态；
- 6) 以基于感应电能供电技术的谐波控制方法作为对照 2 组，重复上述实验步骤，记录电流谐波、电压谐波的实验数值；
- 7) 统计实验组、对照组实验结果，分析本次实验的具体结论。

#### 3.2 设备与参数

搭建如图 3 所示的实验电路，利用电流表、电压表测量实验过程中的电量谐波数值，其中电流表所测结果为各支路电流数值之和，电压表所测结果为电动机两端的负载

电压数值。

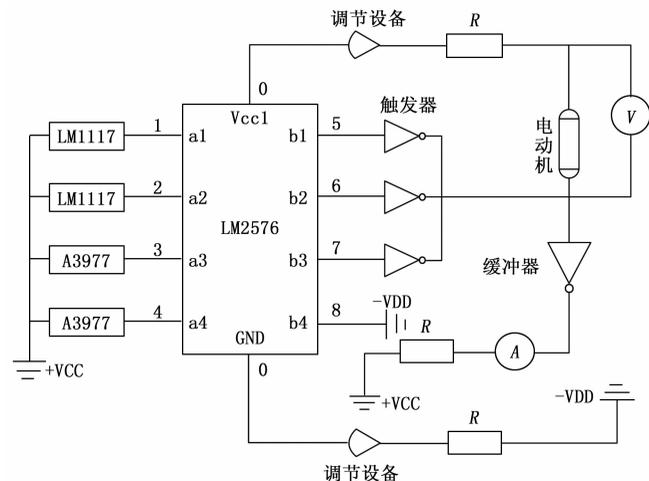


图 3 实验电路

本次实验所选设备元件的具体型号如表 1 所示。

表 1 实验设备

编号	设备元件	名称
1	信号触发器	VC-818TX
2	调节设备	JFZ1929
3	电动机	YE4-355L2-6
4	缓冲器	ACA0806
5	变阻器	LM1117
6		A3977
7	谐波芯片	LM2576

为保证实验结果的公平性, 除所采用方法不同外, 实验组、对照组其他实验条件完全保持一致。

### 3.3 实验结果

图 4 反映了实验组、对照组电流谐波与电压谐波的数值变化情况。

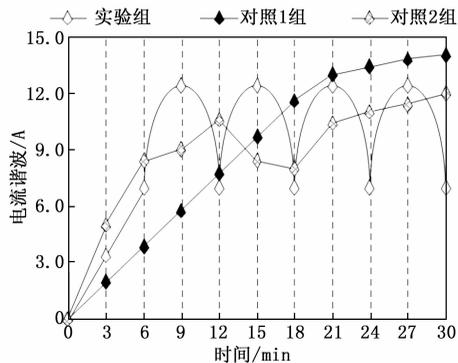


图 4 电流谐波

分析图 4 可知, 至第 6 min, 实验组电流谐波开始进入稳定的波动变化状态, 整个实验过程中, 其波动区间为 6.8~12.4 A; 对照 1 组电流谐波则始终不断增大, 并无明显波动变化规律; 对照 2 组电流谐波出现无规律变化状态。

说明与对照 1 组和对照 2 组相比, 实验组电流变化更为规律和稳定, 说明本文方法的控制效果更好。

分析图 5 可知, 在 3~30 min 的实验时间内, 实验组电压谐波一直保持来回波动的数值变化状态, 其波动区间为 112~118 V; 在 9~12 min 的实验时间内, 对照 1 组电压谐波数值保持稳定, 但其持续时长明显小于实验组; 在 21~30 min 的实验时间内, 对照 2 组电压谐波数值保持稳定, 其持续时长也远小于实验组。

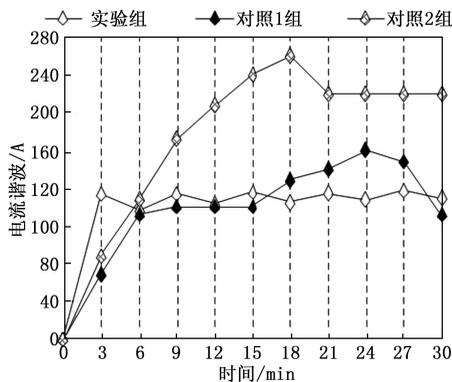


图 5 电压谐波

在此基础上, 对比了实验组、对照 1 组、对照 2 组控制下的电流谐波与电压谐波畸变率。其中谐波电压畸变率主要用于衡量谐波电压畸变的大小, 评估谐波干扰的程度; 谐波电流畸变率能够反映电流中存在的谐波程度, 评估谐波污染的度, 也是评价谐波控制效果的重要指标之一。

电流谐波与电压谐波畸变率对比结果如表 2 和表 3 所示。

表 2 电流谐波畸变率

时间/min	实验组/%	对照 1 组/%	对照 2 组/%
3	1.56	12.48	12.85
6	2.68	13.65	8.96
9	2.47	14.78	10.45
12	2.55	15.99	8.97
15	1.98	16.51	9.65
18	1.58	14.75	9.74
21	1.66	15.62	9.36
24	2.47	17.85	8.47
27	2.36	18.62	8.66
30	2.74	15.55	8.49
平均值	2.21	15.58	9.56

分析表 2 中的数据可知, 实验组的电流谐波畸变率最大值为 2.74%, 平均值为 2.21%, 最小值为 1.58%; 对照 1 组的电流谐波畸变率最大值为 18.62, 平均值为 15.58%, 最小值为 12.48%; 对照 2 组的电流谐波畸变率最大值为 12.85%, 平均值为 9.56%, 最小值为 8.47%; 无论是从哪方面来看, 实验组的电流谐波畸变率均是最低的, 说明该方法对于电流谐波的控制效果好。

表 3 电压谐波畸变率

时间/min	实验组/%	对照 1 组/%	对照 2 组/%
3	2.69	11.58	25.63
6	3.58	12.33	24.14
9	2.44	14.78	21.22
12	2.56	15.66	20.56
15	3.14	11.32	19.88
18	3.65	14.78	23.63
21	3.52	12.63	24.78
24	2.24	11.14	26.33
27	2.66	15.99	25.41
30	2.41	12.58	26.84
平均值	2.89	13.28	23.84

分析表 3 中的数据可知,随着实验时间的不断发展变化,实验组、对照 1 组、对照 2 组控制下的电压谐波畸变率均发生了显著变化。其中,实验组的电压谐波畸变率最大值为 3.65%,平均值为 2.89%,最小值为 2.24%;对照 1 组的电压谐波畸变率最大值为 15.99%,平均值为 13.28%,最小值为 11.14%;对照 2 组的电压谐波畸变率最大值为 26.84%,平均值为 23.84%,最小值为 19.88%;与对照 1 组、对照 2 组相比,实验组控制下的电压谐波畸变率是最低的,说明该方法对于电压谐波的控制效果更好。

存在实验室用电谐波的情况下,实验室电力系统会由稳定状态变为非稳定状态,而利用实验组、对照 1 组、对照 2 组对于实验室用电谐波深度进行控制后,会使电力系统由非稳定状态向稳定状态转变,从而使电力系统恢复正常运行,这一过程所用时间越短,控制效率越高,则实验组、对照 1 组、对照 2 组的控制时间对比如表 4 所示。

表 4 控制时间对比结果

实验次数	实验组/s	对照 1 组/s	对照 2 组/s
5	0.69	3.62	2.58
10	0.58	3.58	2.63
15	0.75	3.47	2.34
20	0.63	3.55	2.54
25	0.58	3.86	2.47
30	0.47	3.47	2.63
35	0.61	3.59	2.36
40	0.55	3.22	2.85
45	0.47	3.14	2.34
50	0.61	3.63	2.47
平均值	0.59	3.51	2.52

分析表 4 中的数据可知,实验组的实验室用电谐波深度控制时间平均值为 0.59 s,对照 1 组的实验室用电谐波深度控制时间平均值为 3.51 s,对照 2 组的实验室用电谐波深度控制时间平均值为 2.52 s,实验组的实验室用电谐波深度控制是最短的,说明该方法的能够快速使实验室电力系统由非稳定状态向稳定状态转变,从而保证其正常稳定运行。

综上所述,基于电场耦合法的谐波检测与控制方法、基于感应电能供电技术的谐波控制方法应用下,电压谐波、电流谐波虽然能够出现稳定波动状态,但其持续时间相对较短,不利于解决因谐波不稳定而造成的电力损耗问题;基于谱序列变换的实验室用电谐波深度控制方法可以长时间维持电压谐波、电流谐波数值的稳定波动状态,且电压与电流谐波畸变率始终处于较低的水平,能够快速使实验室电力系统恢复正常,可以较好解决因谐波不稳定而造成的电力损耗问题,更符合有效控制实验室用电行为的实际应用需求。

#### 4 结束语

文章在根据谱序列变换原则估算实验室用电谐波参数取值范围,提取实验室用电谐波特征。设计谐波控制器架构,通过计算死区补偿向量与控制参数的方式,实现对用电谐波的深度控制。实验测试结果表明,相较于基于电场耦合法的谐波检测与控制方法、基于感应电能供电技术的谐波控制方法,这种新型控制能够使电压谐波、电流谐波保持稳定变化趋势,不但解决了因电量谐波不稳定而造成的电力损耗问题,还实现了对实验室用电行为的有效控制,且电压与电流谐波畸变率始终处于较低的水平,能够快速使实验室电力系统恢复正常。此外,基于谱序列变换的实验室用电谐波深度控制方法的实施还可以减少对环境的污染,提高电力系统的安全性和稳定性,在实现节能减排的同时保障实验室用电设备的正常运行。因此,对于需要进行频繁实验的实验室而言,使用用电谐波深度控制方法是一种非常有效和值得推广的控制技术,利用该技术可以有效地控制实验室用电设备产生的电磁干扰,并提高电力系统的功率因数,降低能耗,对于实验室用电谐波深度控制领域的进一步发展具有重要的参考意义。

#### 参考文献:

- [1] 林士琪. 电力系统谐波对继电保护的影响分析 [J]. 集成电路应用, 2021, 38 (1): 44-45.
- [2] 秦华忠, 朱明轩, 罗毅, 等. 一起因谐振引起的并联电容器组爆裂故障分析 [J]. 广西电力, 2021, 44 (6): 78-81, 98.
- [3] 张国灿, 杨文陵, 连和, 等. 基于电场耦合法的高压输电线路谐波检测方法的研究与设计 [J]. 电测与仪表, 2020, 57 (21): 18-23.
- [4] 辛国庆, 董唯光, 高锋阳, 等. 感应电能供电技术下含间谐波的谐波信号重构 [J]. 电工技术学报, 2020, 35 (21): 4544-4552.
- [5] 姜海玲, 姚奕旭, 洪绣超, 等. 基于 SG 滤波去噪的时间序列谐波分析重建算法研究 [J]. 吉林师范大学学报 (自然科学版), 2021, 42 (3): 133-140.
- [6] 杨喜, 汪旭明, 陈炳权, 等. 基于谱序列变换的高精度谐波参数估计算法 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2020, 51 (9): 2504-2513.
- [7] 熊丹丹, 刘剑锋, 赵红景天, 等. 基于稀疏迭代协方差矩阵的谐波参数快速估计方法 [J]. 信号处理, 2021, 37 (8): 1419

-1429.

- [8] 徐方维, 王 川, 郭 凯, 等. 基于无相位实测数据的系统侧谐波阻抗估计方法改进 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (9): 3149-3158.
- [9] 雷金勇, 葛 俊, 谈赢杰, 等. 三相四桥臂逆变器不对称故障穿越限流控制及电网电压支撑改进策略 [J]. 电网技术, 2020, 44 (3): 944-952.
- [10] 宋 超, 张 兴, 王宝基, 等. 基于电压空间矢量  $180^\circ$ 解耦的开绕组双逆变器光伏发电系统无功补偿控制 [J]. 太阳能学报, 2020, 41 (9): 175-183.
- [11] 赵禹灿, 姜 旭, 孙福寿, 等. 基于谐波特性的光伏孤岛与低电压穿越同步检测方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50 (3): 41-50.
- [12] 刘雪强, 焦雅琼. 面向碳中和的电力系统复杂谐波信号检测方法 [J]. 电气自动化, 2022, 44 (6): 80-82, 86.
- [13] 赵 涛, 刘乐康, 孙建涛, 等. 特高压换流变压器网侧绕组电流检测系统设计及谐波特性分析 [J]. 高电压技术, 2021, 47 (4): 1443-1450.
- [14] 朱 婷, 胡海涛, 陶海东. 基于 HSS 的三相 VSC 频率耦合导纳建模与谐波特性分析 [J]. 电机与控制学报, 2022, 26 (3): 78-86.
- [15] 余亚东. 一种红外气体检测中谐波信号锁相放大器的设计 [J]. 激光与红外, 2021, 51 (11): 1460-1465.
- [16] 胡秀芳, 王 跃, 吕双庆, 等. 基于谐波状态空间的无线电能传输系统建模和稳定性分析 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46 (上接第 108 页)
- [6] 林 娜, 冯丽蓉, 张小青. 基于优化 Faster-RCNN 的遥感影像飞机检测 [J]. 遥感技术与应用, 2021, 36 (2): 275-284.
- [7] 姚艳清, 程 焱, 谢星星, 等. 多分辨率特征融合的光学遥感图像目标检测 [J]. 遥感学报, 2021, 25 (5): 1124-1137.
- [8] 张晓雅, 李承政, 徐静杉, 等. 级联结构的遥感目标检测算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33 (10): 1524-1531.
- [9] 赵文清, 康怿瑾, 赵振兵, 等. 改进 YOLOv5s 的遥感图像目标检测 [J]. 智能系统学报, 2023, 18 (01): 86-95.
- [10] WANG Q, WU B, ZHU P, et al. ECA-Net: Efficient Channel Attention for Deep Convolutional Neural Networks [C] // 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Seattle: IEEE, 2020: 11531-11539.
- [11] XU X, FENG Z, CAO C, et al. An Improved Swin Transformer-Based Model for Remote Sensing Object Detection and Instance Segmentation [J]. Remote Sensing, 2021, 13 (23): 4779.
- [12] 李坤亚, 欧 鸥, 刘广滨, 等. 改进 YOLOv5 的遥感图像目标检测算法 [J]. 计算机工程与应用, 2023, 59 (9): 207-214.
- [13] QUAN Y, ZHANG D, ZHANG L, et al. Centralized Feature Pyramid for Object Detection [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2023.
- [14] GE Z, LIU S, WANG F, et al. YOLOX: Exceeding YOLO Series in 2021 [J]. arXiv preprint arXiv: arXiv: 2107.08430, (11): 121-130.
- [17] 郑 仙, 肖先勇, 王 杨. 基于谐波阻抗矩阵约束的系统侧谐波阻抗估计方法 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41 (4): 170-176.
- [18] 陈仁祥, 张 勇, 杨黎霞, 等. 基于整周期数据和卷积神经网络的谐波减速器健康状态评估 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41 (2): 245-252.
- [19] 马永翔, 陈昊睿, 闫群民, 等. 基于灰狼优化算法的 SSSC 阻尼功率振荡控制器设计 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41 (3): 1-6.
- [20] 叶 杰, 汤广福, 赵成勇. 基于电网阻抗识别的谐波控制器调谐策略 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2021, 49 (5): 26-31.
- [21] 胡启国, 张 祥. 基于新型死区补偿的永磁同步轮毂电机矢量控制研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2022, 41 (7): 144-150.
- [22] 赵小强, 刘舒宁, 杨蒲寒婷, 等. 基于死区时间补偿的永磁同步电机改进型模糊自适应 PI 控制策略 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (8): 8-14.
- [23] 艾松波, 唐 欣, 王红亚. 光伏电站附加阻尼控制器及控制参数优化设计 [J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35 (6): 21-27.
- [24] 孟 柳, 章回炫, 范 涛. 永磁同步电机静止参数辨识及电流环控制器自动参数整定 [J]. 兵工学报, 2021, 42 (10): 2114-2122.
- [15] FARHADI A, REDMON J. YOLOv3: an incremental improvement [C] // 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City: IEEE, 2018: 1804-2767.
- [16] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H M, et al. YOLOv4: optimal speed and accuracy of object detection [C] // 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Seattle: IEEE, 2020: 2-7.
- [17] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, et al. Attention is All you Need [C] // Guyon I, Von Luxburg U, Bengio S, Wallach H, Fergus R, Vishwanathan S, Garnett R, eds. Advances in Neural Information Processing Systems. Vol 30. Curran Associates, Inc.; 2017.
- [18] LIU Z, MAO H, WU C Y, et al. A ConvNet for the 2020s [C] // Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. 2022: 11966-11976.
- [19] LIU S, QI L, QIN H, et al. Path Aggregation Network for Instance Segmentation [C] // 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City: IEEE; 2018: 8759-8768.
- [20] ZHANG D, ZHANG H, TANG J, et al. Self-Regulation for Semantic Segmentation [C] // Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2021: 6933-6943.
- [21] GEVORGYAN Z. SiO Loss: More Powerful Learning for Bounding Box Regression [O]. ArXiv, 2022, abs/2205.12740.