

# CPT及IRPT多场景电流分解对比及分析

丁勇, 茆美琴

(合肥工业大学 光伏系统教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**以新能源为主体的新型电力系统发展对系统计量装置、功率变换设备等提出了新要求,迫切需要革新功率理论指导上述设备的设计与控制,以适应不同电气系统结构。通过构建多种含不同源荷类型的三相电气系统场景,针对守恒功率理论(CPT)及瞬时无功功率理论(IRPT),重点讨论二者在不同应用场景中电流分解的相似点及不同点。分析结果显示:IRPT仅在电压正弦条件下可以获得较好的电流分解结果,而基于CPT的电流分解,在正弦或非正弦等不同电压、负荷情况下均可较好地解释功率传输现象、分析负荷特性,其可作为有效的理论工具用于负荷特征识别、电费计量、滤波与补偿、功率变换器等领域中。

**关键词:**非正弦电压;不平衡负荷;瞬时无功功率理论;守恒功率理论;电流分解

**中图分类号:**TM 71

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202207002

## 0 引言

功率理论是分析电路传输功率、计量电费的依据,同时作为电流信号分解方法,也广泛应用于有源滤波器及功率变换器控制中用于生成参考电流<sup>[1-2]</sup>。传统功率理论在单相及三相对称正弦电压条件下的功率传输现象分析、功率补偿等领域已得到普遍认可。而在三相非正弦电压条件下,传统功率理论不再适用<sup>[3]</sup>。随着电力电子化电力系统的不断发展,可再生能源渗透比例持续增加,新型负荷应用快速增长,系统中尤其是在容量较小的微电网边界内,不对称/不平衡、非正弦、非线性现象将日益明显。例如随意连接的单相分布式电源(distributed generator, DG)及负荷将造成源侧及荷侧功率不平衡<sup>[4]</sup>、电力电子接口将引入高频扰动<sup>[5]</sup>、电动汽车充电可能产生谐波污染<sup>[6]</sup>等。因此,寻求适用于非正弦条件下的功率理论在当前建设以新能源为主体的新型电力系统背景下有着重要的理论及现实意义。

从20世纪20年代起,关于非正弦电压条件下的各种功率理论学说相继被提出。按照适用系统不同,可分为单相、三相及单/三相非正弦功率理论3类;按照处理域不同,可分为频域功率理论<sup>[7-10]</sup>、时频域功率理论<sup>[11]</sup>、几何代数域功率理论<sup>[12]</sup>及时域功率理论<sup>[13-16]</sup>4类。其中,频域功率理论和时频域功率理论需要采用傅里叶变换获得电压、电流信号各次谐

波表达式,分析通常较为复杂、费时,一般应用于电路稳态分析,特别是谐波分析领域。典型理论包括频域中的Budeanu理论<sup>[7]</sup>、S&Z理论<sup>[8]</sup>、Sharon理论<sup>[9]</sup>、IEEE 1459—2010标准<sup>[10]</sup>及时频域中的电流物理分量(currents' physical component, CPC)理论<sup>[11]</sup>等;几何代数域功率理论<sup>[12]</sup>通过引入几何代数变换将时域电压、电流信号映射到几何代数域中,定义电压和电流向量的几何积为电路的几何视在功率,其包含电路的瞬时有功及无功功率信息。几何代数域功率理论涉及几何代数域及时域间的多次变换,且目前仅适用于单相非正弦系统。相比而言,时域功率理论直接对电压、电流信号进行时域计算,不涉及傅里叶变换及几何代数映射,具有“瞬时性”或“类瞬时性”特征,可更好地适应电力电子设备的实时控制要求,典型时域功率理论包括Fryze理论<sup>[13]</sup>、FBD理论<sup>[14]</sup>、瞬时无功功率理论(instantaneous reactive power theory, IRPT)<sup>[15]</sup>、守恒功率理论(conservative power theory, CPT)<sup>[16]</sup>等。

上述功率理论已分别在非正弦系统电路分析、计量、功率补偿、功率控制等领域得到应用,但应用于相同电路时可能得到彼此不同甚至相互矛盾的结果,其主要原因在于各理论采用的电流/功率分解方式不一。换言之,上述功率理论只适用于特定的应用领域。例如IRPT已被广泛应用于对称正弦三相系统的有源滤波领域,但不能用于电费计量,且不适用于单相系统。CPT作为一种新兴的时域功率理论,近年来越来越受到关注,被认为是可能同时应用于电路分析、计量、补偿及功率变换器控制的“通用”功率理论<sup>[17]</sup>。

不同功率理论间的比较已有少量研究,但多为理论及数学阐述<sup>[18-19]</sup>。也有部分文献进行了IRPT或CPT与其他功率理论的对比研究,但总体上通过具体案例对IRPT与CPT在电流分解中的应用进行

收稿日期:2021-11-14;修回日期:2022-02-25

在线出版日期:2022-07-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577047);高等学校学科创新引智计划资助项目(“111”项目)(BP0719039);国家留学基金委联合培养博士生项目(201806690013)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577047), the 111 Project(BP0719039) and the State Scholarship Fund by China Scholarship Council(201806690013)

对比,还鲜有成果报道。为此,本文在介绍基于 IRPT 及 CPT 的电流分解原理基础上,构建含不同源荷特性的多类型三相电气系统场景,通过具体应用场景对比,直观分析 2 种时域功率理论间的联系与不同,为 2 种功率理论应用于不同场景下计量、滤波、功率变换等装置中的设计与控制提供参考。

## 1 IRPT 及 CPT 理论基础

IRPT 及 CPT 均属于时域功率理论,2 种功率理论对电流、功率的定义均在时域中进行,直接对电压、电流信号进行时域计算。其中,IRPT 在  $\alpha\beta$  坐标系下对各电流、功率项进行定义,CPT 的电流、功率项定义则是在  $abc$  坐标系下完成。

### 1.1 IRPT 理论基础

IRPT 主要依据 Clarke 变换将  $abc$  坐标系中的三相系统电压及电流信号  $x_n$  ( $x=v, i$  分别表示电压、电流信号; $n=1, 2, 3$ , 分别表示 A、B、C 相) 转换成  $\alpha\beta$  坐标系中的电压、电流信号  $x_\alpha, x_\beta$ , 进而在  $\alpha\beta$  坐标系下定义系统的瞬时有功功率、瞬时无功功率及相关的电流项。 $abc$  坐标系与  $\alpha\beta$  坐标系之间的关系如附录 A 图 A1 所示。由图 A1 及式(1)可将  $x_1-x_3$  变换为  $x_\alpha, x_\beta$ , 如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$k = \begin{cases} \frac{2}{3} & \text{等幅值变换} \\ \sqrt{\frac{2}{3}} & \text{等功率变换} \end{cases}$$

IRPT 框架下的瞬时复功率  $S$  与传统功率理论中的复功率类似,定义为  $\alpha\beta$  坐标系下的电压矢量  $v$  与电流矢量  $i$  的共轭复数  $i^*$  的乘积,即:

$$S = vi^* = (v_\alpha + jv_\beta)(i_\alpha - ji_\beta) = \underbrace{(v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta)}_p + j \underbrace{(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta)}_q \quad (2)$$

式中: $p$  为瞬时有功功率或瞬时实功率; $q$  为瞬时无功功率或瞬时虚功率; $v_\alpha, v_\beta$  分别为  $v$  的  $\alpha$ 、 $\beta$  轴分量; $i_\alpha, i_\beta$  分别为  $i$  的  $\alpha$ 、 $\beta$  轴分量。

根据式(2),可得  $\alpha\beta$  坐标系下瞬时电流  $i_\alpha, i_\beta$  为:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\alpha \bar{p}} \\ i_{\beta \bar{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha \tilde{p}} \\ i_{\beta \tilde{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha \bar{q}} \\ i_{\beta \bar{q}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha \tilde{q}} \\ i_{\beta \tilde{q}} \end{bmatrix} =$$

$$\frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ 0 \end{bmatrix} \right) +$$

$$\frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \right) \quad (3)$$

式中: $\bar{p}, \bar{q}$  和  $\tilde{p}, \tilde{q}$  分别为瞬时有功、无功功率的直流(平均)分量和交流(振荡)分量; $i_{\alpha \bar{p}}, i_{\beta \bar{p}}$  分别为瞬时有

功电流的  $\alpha$ 、 $\beta$  轴分量; $i_{\alpha \tilde{p}}, i_{\beta \tilde{p}}$  分别为瞬时无功电流的  $\alpha$ 、 $\beta$  轴分量; $i_{\alpha \bar{q}}, i_{\beta \bar{q}}$  分别为平均有功电流的  $\alpha$ 、 $\beta$  轴分量; $i_{\alpha \tilde{q}}, i_{\beta \tilde{q}}$  分别为振荡有功电流的  $\alpha$ 、 $\beta$  轴分量; $i_{\alpha \bar{q}}, i_{\beta \bar{q}}$  分别为平均无功电流的  $\alpha$ 、 $\beta$  轴分量; $i_{\alpha \tilde{q}}, i_{\beta \tilde{q}}$  分别为振荡无功电流的  $\alpha$ 、 $\beta$  轴分量<sup>[15]</sup>。

基于 IRPT 的电流分解示意图如图 1 所示。在存在畸变的情况下,瞬时有功、无功功率均包含两部分,即直流(平均)分量  $\bar{p}$  及  $\bar{q}$ 、交流(振荡)分量  $\tilde{p}$  及  $\tilde{q}$ 。 $q$  对负载与电源之间的能量流在任意瞬间都没有贡献,表示系统各相之间交换的能量大小,其决定了瞬时无功功率  $\alpha$ 、 $\beta$  轴分量的大小,瞬时无功功率  $\alpha$ 、 $\beta$  轴分量之和总等于 0。 $\bar{p}$  及  $\bar{q}$  仅与基波电压、电流有关,而  $\tilde{p}$  及  $\tilde{q}$  与谐波/不平衡电压、电流有关。

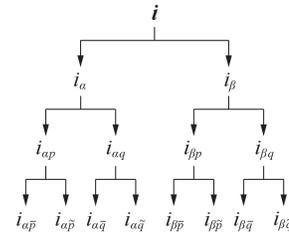


图 1 基于 IRPT 的电流分解示意图

Fig.1 Schematic diagram of current decomposition based on IRPT

通过上述分解,系统三相电流在 IRPT 框架下可用  $\alpha\beta$  坐标系下的 8 项子电流表示,对应的  $\alpha$ 、 $\beta$  轴子电流经过 Clarke 反变换即可得到  $abc$  坐标系下的各子电流,其中平均有功、无功电流与基波分量有关,瞬时有功、无功振荡电流与谐波、不平衡分量有关。

### 1.2 CPT 理论基础

CPT 主要根据电压及电流的“无偏变量”或“同源变量”,定义相关的功率项及电流项,“无偏变量”或“同源变量”的定义<sup>[16]</sup>为:

$$\begin{cases} \hat{x}(t) = \omega \left( \int_0^T x(t) dt - \int_0^T x(t) dt \right) \\ \check{x}(t) = \frac{1}{\omega} x'(t) \end{cases} \quad x=v, i \quad (4)$$

式中: $\omega$  为信号频率; $T$  为周期;“ $\hat{\cdot}$ ”表示平均值计算; $x'(t)$  为  $x(t)$  的微分;“ $\hat{\cdot}$ ”为同源积分标志;“ $\check{\cdot}$ ”为同源微分标志。

依据上述电压、电流的“无偏变量”及原始变量,可以获得多种守恒的功率或功率相关的定义<sup>[17]</sup>。CPT 最常采用的瞬时有功功率  $p$  及无功能量  $w$  定义为:

$$\begin{cases} p = \sum_{n=1}^3 v_n i_n \\ w = \sum_{n=1}^3 \hat{v}_n i_n \end{cases} \quad (5)$$

在单相系统中,CPT 相关电流定义为:

$$\begin{cases} i_{\text{act}} = \frac{P}{V^2} v = \frac{\langle v, i \rangle}{\langle v, v \rangle} v = G_{\text{act}} v \\ i_{\text{rea}} = \frac{W}{\hat{V}^2} \hat{v} = \frac{\langle \hat{v}, i \rangle}{\langle \hat{v}, \hat{v} \rangle} \hat{v} = B_{\text{rea}} \hat{v} \\ i_{\text{void}} = i - i_{\text{act}} - i_{\text{rea}} \end{cases} \quad (6)$$

式中：“ $\langle \cdot, \cdot \rangle$ ”表示内积计算，具体运算见附录B的B1部分； $P$ 、 $W$ 分别为系统平均有功功率、无功能量； $V$ 和 $\hat{V}$ 分别为电压有效值及其同源积分变量的有效值； $G_{\text{act}}$ 为等效电导； $B_{\text{rea}}$ 为等效无功性； $i_{\text{act}}$ 为有功电流， $i_{\text{rea}}$ 为无功电流， $i_{\text{void}}$ 为空电流，根据定义可知，这3项电流彼此正交，且具有明确的物理意义，与特定的功率现象相关<sup>[16]</sup>。

在三相系统中，各相有功、无功电流定义与单相系统定义一致，但因三相系统可能存在负荷不平衡，CPT将各相有功及无功电流进一步分解成平衡有功电流和不平衡有功电流，分别如式(7)、(8)所示。

$$\begin{cases} i_{\text{actn}}^{\text{bal}} = \frac{\sum_{n=1}^3 P_n}{V_{\text{col}}^2} v_n = G^{\text{bal}} v_n \\ i_{\text{rean}}^{\text{bal}} = \frac{\sum_{n=1}^3 W_n}{\hat{V}_{\text{col}}^2} \hat{v}_n = B^{\text{bal}} \hat{v}_n \\ i_{\text{actn}}^{\text{unb}} = i_{\text{actn}} - i_{\text{actn}}^{\text{bal}} = (G_{\text{actn}} - G^{\text{bal}}) v_n \\ i_{\text{rean}}^{\text{unb}} = i_{\text{rean}} - i_{\text{rean}}^{\text{bal}} = (B_{\text{rean}} - B^{\text{bal}}) \hat{v}_n \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} i_{\text{actn}}^{\text{unb}} = i_{\text{actn}} - i_{\text{actn}}^{\text{bal}} = (G_{\text{actn}} - G^{\text{bal}}) v_n \\ i_{\text{rean}}^{\text{unb}} = i_{\text{rean}} - i_{\text{rean}}^{\text{bal}} = (B_{\text{rean}} - B^{\text{bal}}) \hat{v}_n \end{cases} \quad (8)$$

式中： $i_{\text{actn}}^{\text{bal}}$ 、 $i_{\text{rean}}^{\text{bal}}$ 分别为各相平衡有功、无功电流； $V_{\text{col}}$ 和 $\hat{V}_{\text{col}}$ 分别为三相电压向量及其同源积分变量向量的集合有效值； $P_n$ 、 $W_n$ 分别为各相有功功率、无功能量； $G^{\text{bal}}$ 、 $B^{\text{bal}}$ 分别为系统等效平衡电导、等效平衡无功性； $i_{\text{actn}}$ 、 $i_{\text{rean}}$ 分别为各相有功、无功电流； $G_{\text{actn}}$ 、 $B_{\text{rean}}$ 分别为各相等效电导、等效无功性； $i_{\text{actn}}^{\text{unb}}$ 、 $i_{\text{rean}}^{\text{unb}}$ 分别为各相不平衡有功、无功电流。

从式(7)、(8)可看出，CPT下定义的各相平衡有功电流及无功电流始终分别与各相电压及电压同源积分波形呈比例关系。

综上所述，三相系统电流在CPT下可分解为平衡有功电流、平衡无功电流、不平衡有功电流、不平衡无功电流及空电流，且各项电流彼此正交，具体分解如图2所示。

相较于IRPT而言，CPT可将电流分解为更多与特定物理现象如无功损耗、谐波等相关联的子项，尤其是可提取出系统中的不平衡电流。更多电流信息

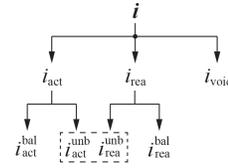


图2 基于CPT的电流分解示意图  
Fig.2 Schematic diagram of current decomposition based on CPT

的获取，为灵活电流补偿及逆变器控制提供了理论基础。值得说明的是，在正弦线性条件下，CPT的功率定义与传统功率理论定义具有一致性，传统功率理论中的功率定义可视为CPT功率理论的特例，详细说明见附录B的B2部分。

## 2 基于IRPT及CPT的电流检测与分解

对原始电流进行合理、准确的分解，是后续电流补偿及控制的关键。本节基于第1节所述的IRPT及CPT的基本理论基础，阐述基于IRPT及CPT的电流检测及分解方法。

### 2.1 基于IRPT的电流分解方法

因IRPT下功率的直流分量仅与基波电压、电流相关，而交流分量与谐波电压、电流相关。据此原则，可得到基于 $p$ 、 $q$ 计算的电流检测方法如图3所示。图中： $abc-\alpha\beta$ 及 $\alpha\beta-abc$ 环节分别表示三相静止坐标系-两相静止坐标系坐标变换及其逆变换；LPF环节表示低通滤波；三相电压 $v_n$ 和三相电流 $i_n$ 分别经过 $abc-\alpha\beta$ 变换得到 $v_\alpha$ 、 $v_\beta$ 和 $i_\alpha$ 、 $i_\beta$ ，再通过式(2)计算获得瞬时实功率 $p$ 及虚功率 $q$ ；利用经LPF环节获得的功率平均分量 $\bar{p}$ 、 $\bar{q}$ 及式(3)，可计算得到IRPT下系统平均有功电流的 $\alpha$ 、 $\beta$ 轴分量 $i_{\alpha\bar{p}}$ 及 $i_{\beta\bar{p}}$ 和平均无功电流的 $\alpha\beta$ 轴分量 $i_{\alpha\bar{q}}$ 及 $i_{\beta\bar{q}}$ ，经 $\alpha\beta-abc$ 变换最终可分别获取IRPT下的三相平均有功电流 $i_{n\bar{p}}$ 及平均无功电流 $i_{n\bar{q}}$ ；三相振荡电流 $i_{n\text{osc}}$ 可通过从原始电流中分别减去平均有功电流及平均无功电流获得。

### 2.2 基于CPT的电流分解方法

根据式(4)~(8)可得到基于CPT的电流检测与分解方法，如图4所示。图中：RMS表示有效值计算；AVE表示平均值计算，用于计算各相的无功能量 $W_n$ 及有功功率 $P_n$ ，进而根据式(6)和式(7)分别计算各相有功电流 $i_{\text{actn}}$ 、无功电流 $i_{\text{rean}}$ 和各相平衡有功电流 $i_{\text{actn}}^{\text{bal}}$ 、平衡无功电流 $i_{\text{rean}}^{\text{bal}}$ ；各相电流与各相有功、无功电流之差即为各相空电流 $i_{\text{voidn}}$ ；各相有功电流与平

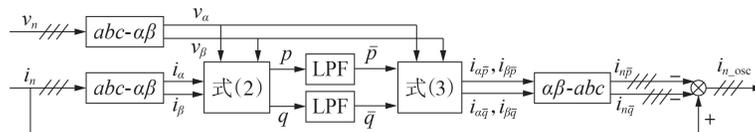


图3 基于IRPT计算 $p$ 、 $q$ 的电流检测示意图  
Fig.3 Schematic diagram of IRPT-based current detection using  $p$  and  $q$  calculation

衡有功电流之差、无功电流与平衡无功电流之差分别为不平衡有功电流  $i_{actn}^{unb}$ 、不平衡无功电流  $i_{rean}^{unb}$ 。

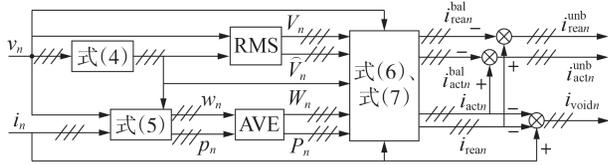


图 4 基于 CPT 的电流检测示意图

Fig.4 Schematic diagram of CPT-based current detection

### 3 多场景应用对比与讨论

为了评估基于 IRPT 及 CPT 在不同条件下的电流检测与分解效果,本文在 MATLAB / Simulink 环境下构建含不同源荷特性的多类型三相系统运行场景,并对各场景下的电流分析结果进行比较。需要说明的是,本文各场景中,电源中性点引出接地,以此为参考电压,使用 3 个电压测量模块采集各相电压。在电压中性点未引出的情况下,可采用虚拟星接法获取各相电压<sup>[20]</sup>。

#### 3.1 场景 1:含正弦电压、不平衡负荷

本场景的系统结构及源荷参数分别如图 5 及表 1 所示,图 5 中  $v_M$ 、 $i_M$  分别为电压测量点、电流测量点。

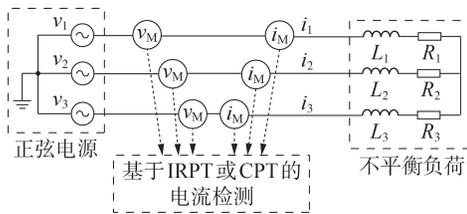


图 5 场景 1 下系统结构

Fig.5 System structure in Scenario 1

表 1 场景 1 下系统参数

Table 1 System parameters in Scenario 1

电源电压 / V	不平衡负荷
$v_1=311 \sin(\omega t)$	$R_1=13 \Omega, L_1=5 \text{ mH}$
$v_2=311 \sin(\omega t-120^\circ)$	$R_2=26 \Omega, L_2=3 \text{ mH}$
$v_3=311 \sin(\omega t+120^\circ)$	$R_3=39 \Omega, L_3=1 \text{ mH}$

系统三相电压、电流波形如附录 C 图 C1 所示。由图可见:三相系统电压为正弦对称电压;但因不平衡负荷的存在,三相电流呈现不平衡状态,且因存在感性负荷,各相电压超前电流一定相位。

基于 IRPT 的电流分解结果见图 6。图中, A 相电压分别等比例压缩为原波形的 1/20 及 1/200, 后续各场景均如此处理,不再赘述。由图可见:基于 IRPT 得到的平均有功电流与电压同相位,反映了负荷中的阻性分量;类似地,IRPT 平均无功电流滞后电压  $90^\circ$ ,反映了负荷中的感性分量。本场景中,振荡电流不为 0,说明系统负荷存在不平衡或 / 和非线性特性,但不能进一步分析究竟由何种非理想特性引发。

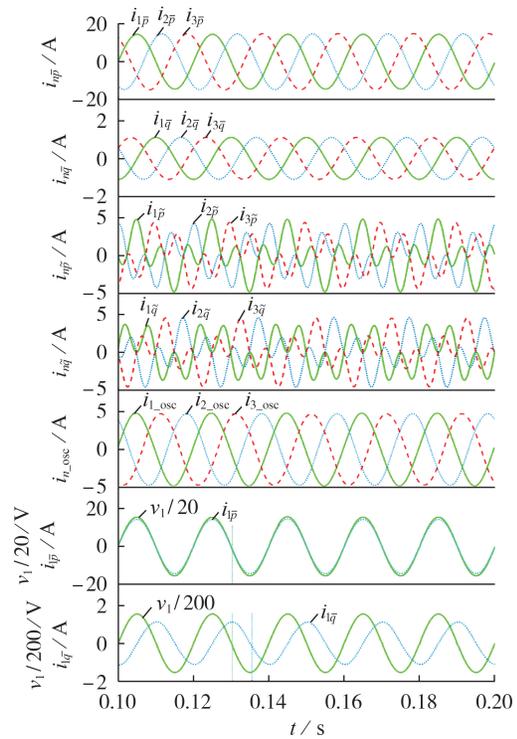


图 6 场景 1 下基于 IRPT 的电流分解结果

Fig.6 Current decomposition results based on IRPT in Scenario 1

基于 CPT 的电流分解结果见图 7。图中:  $i_{nonan}$  为各相非有功电流; A 相电压及其同源积分等比例缩小为原波形的 1/40, 平衡有功电流缩小为原波形的

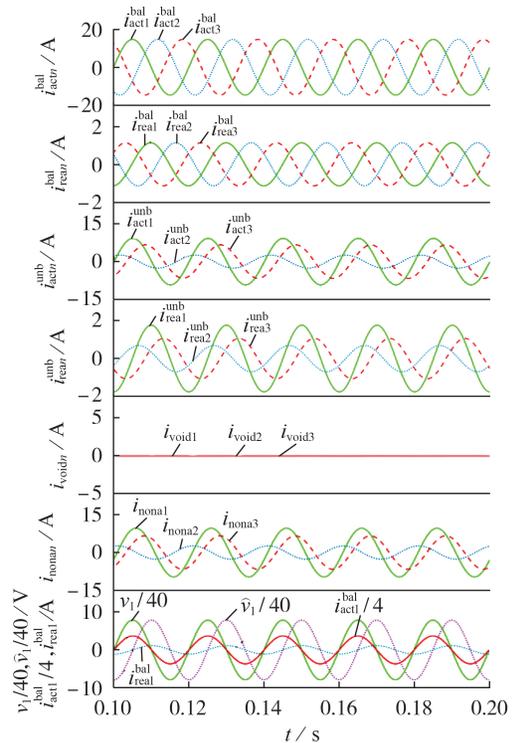


图 7 场景 1 下基于 CPT 的电流分解结果

Fig.7 Current decomposition results based on CPT in Scenario 1

1/4,后续各场景均如此处理,不再赘述。由图可见:基于CPT得到的各相平衡有功电流与电压、平衡无功电流与电压同源积分(滞后原始电压 $90^\circ$ )波形分别同相位且成比例,这表明基于CPT得到的平衡有功及无功电流分别反映了负荷中平衡线性阻性和感性负荷分量;CPT可进一步将负荷不平衡及非线性特性分离,其中不平衡有功及无功电流反映了各相负荷阻性及无功性(本文为感性)分量同等效平衡阻性及无功性分量之间的差异;因本场景不含非线性负荷且电压未畸变,因此反映非线性特性的空电流为0;非有功电流反映了除平衡阻性负荷之外其他所有非理想负荷特性,本场景中其反映了负荷不平衡及无功性。

进一步观察可以发现,平衡有功及无功电流、不平衡有功及无功电流、空电流两两正交,限于篇幅,仅展示平衡有功电流与平衡无功电流、不平衡无功电流与空电流间的内积,如附录C图C2所示。

若将本场景中负荷改为平衡负荷 $R_1=R_2=R_3=13\ \Omega, L_1=L_2=L_3=5\text{mH}$ ,则不平衡有功/无功电流将均为0,如图8所示,这表明负荷中无不平衡现象。

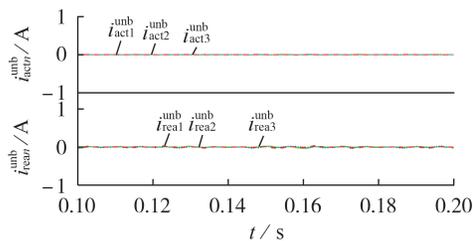


图8 仅含平衡负荷时基于CPT得到的不平衡有功、无功电流

Fig.8 Unbalanced active and reactive currents obtained by CPT when balanced loads are connected

进一步地,若将本场景下的负荷替换为仅含不控整流的非线性负荷,则基于CPT得到的不平衡有功、无功电流将仍然为0,其他相关电流分解结果如图9所示。由图可见,基于IRPT得到的振荡电流与基于CPT得到的空电流波形相同,而基于IRPT得到的振荡有功、无功电流不为0。这进一步说明:采用CPT时,负荷不平衡与非线性特性可分别由不平衡电流及空电流体现;而采用IRPT时,振荡电流反映的是不平衡及非线性综合效应,不可进一步分解。

另外,根据图6、7可观察到本场景中基于IRPT得到的平均有功电流与基于CPT得到的平衡有功电流相等,将式(3)、(7)中两电流表达式重写为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} i_{\alpha\bar{p}} \\ i_{\beta\bar{p}} \end{bmatrix} = \frac{\bar{p}}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \\ i_{actn}^{bal} = \frac{\sum_{n=1}^3 P_n}{V_{col}^2} v_n \end{cases} \quad (9)$$

本场景下电压为三相正弦电压,故基于IRPT得

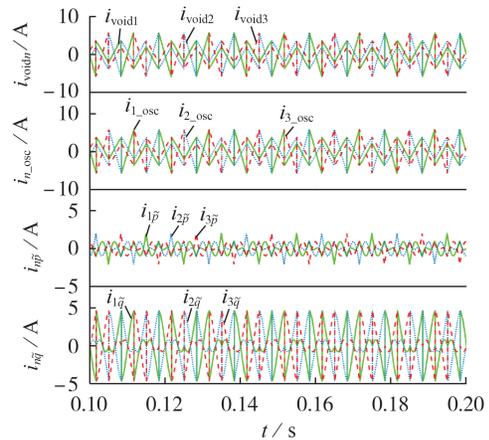


图9 仅含非线性负荷时的相关电流

Fig.9 Related currents when only non-linear loads are connected

到的平均有功电流 $\alpha$ 、 $\beta$ 轴分量中的电压相关项在变换到 $abc$ 坐标系后,与基于CPT得到的平均有功电流中的电压相关项相同,且二者中的有功功率项也相等,因此IRPT平均有功电流与CPT平衡有功电流在本场景中是一致的。

由式(9)还可以观察到:IRPT下的平均有功电流计算涉及瞬时有功功率平均分量获取,应用中一般通过低通滤波器实现,这意味着基于IRPT得到的平均有功电流准确度与低通滤波器的性能有着密切关系;而基于CPT得到的平衡有功电流计算涉及的有功功率一般通过平均值模块获取,其始终为常数,且式(9)中涉及的电压有效值也为常数,故基于CPT得到的平衡有功电流能够始终跟踪电压波形,仿真结果与理论分析一致。

尽管IRPT及CPT分解得到的各电流子项有所差异,但其各相子电流之和 $i_{IRPTn}$ 及 $i_{CPTn}$ 均可还原原电流,如图10所示。

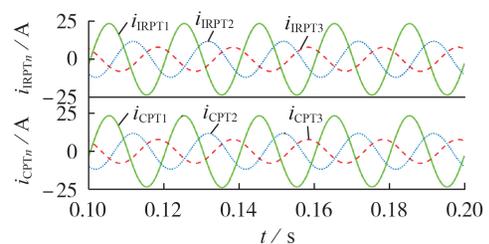


图10 场景1下基于IRPT、CPT得到的各相分解电流之和  
Fig.10 Sums of decomposed currents of each phase obtained by IRPT and CPT in Scenario 1

### 3.2 场景2:含正弦电压、不平衡及非线性负荷

本场景中,系统电压为标准三相对称正弦电压,负荷含三相不平衡负荷及非线性负荷,系统结构如附录C图C3所示,源荷参数如附录C表C1所示。

本场景下的系统三相电压、电流如附录C图C4所示。由图可见,本场景下三相系统电压为正弦电

压,但因不平衡、非线性负荷存在,三相电流发生畸变、不平衡。且因存在感性负荷,各相电压均超前电流一定相位。

本场景下基于 IRPT、CPT 的电流分解结果分别如附录 C 图 C5、C6 所示。由图 C5 可见:本场景下,基于 IRPT 得到的平均有功电流、平均无功电流分别与电压同相位、滞后电压  $90^\circ$ ,分别反映了负荷中的阻性分量和感性分量;本场景中振荡电流也不为 0,同样说明负荷存在不对称或 / 和非线性分量,但 IRPT 无法进一步分解。而由图 C6 可见:基于 CPT 得到的各相平衡有功电流与电压、平衡无功电流与电压同源积分波形分别同相位且成比例,表明 CPT 平衡有功及无功电流分别反映了负荷中的平衡线性阻性和感性负荷分量。与 IRPT 不同,CPT 可进一步将负荷不平衡及非线性特性分离。本场景下的负荷包含非线性负荷,因此空电流不为 0;非有功电流在本场景下反映了负荷不平衡、无功性及非线性。此外,本场景下基于 CPT 得到的各分解电流也两两正交,部分结果如附录 C 图 C7 所示。本场景下基于 IRPT 及 CPT 分解得到的各电流子项之和均可还原原电流,如附录 C 图 C8 所示。

### 3.3 场景 3:含非正弦电压、不平衡负荷

本节构建含非正弦电压、不平衡负荷场景,系统结构与源荷参数分别如附录 C 图 C9 与表 C2 所示。

本场景下的系统三相电压均含有 10% 的 5 次谐波,且 B、C 两相电压的基波幅值分别为 A 相电压基波幅值的 80%、90%,如附录 C 图 C10 所示。尽管负荷不含非线性负荷,但由于电压的畸变,三相电流也发生畸变、不平衡。且因负荷中存在感性负荷,各相电压超前电流一定相位。

本场景下基于 IRPT、CPT 得到的电流分解结果分别如附录 C 图 C11、C12 所示。

由图 C11 可见,场景 3 中基于 IRPT 得到的平均有功电流与电压同相位,负责从“源”向“荷”单向传送功率。但是二者波形不同,主要原因在于利用式(3)计算  $\alpha$ 、 $\beta$  轴平均有功电流分量时,计算系数  $v_{\alpha\beta}/(v_\alpha^2+v_\beta^2)$  由于电压畸变且不对称而存在波动,导致平均有功电流也畸变不对称,如附录 C 图 C13 所示。观察本场景下的平均无功电流可发现其滞后电压  $90^\circ$ 。本场景下,振荡电流不为 0,说明负荷存在不对称或 / 和非线性分量,但 IRPT 无法进一步分解。

由图 C12 可见,本场景下基于 CPT 得到的各相平衡有功电流与电压、平衡无功电流与电压同源积分的波形分别同相位且成比例。换言之,平衡无功电流滞后电压  $90^\circ$  相位。因此,基于 CPT 得到的平衡有功及无功电流分别反映了负荷中的平衡线性阻性和感性分量。从式(7)可以发现,不管系统电压波形如何,因基于 CPT 计算有功电流、无功电流时仅涉

及有效值,故可分别跟踪电压及电压的同源积分。CPT 可进一步将负荷不平衡及非线性特性分离,其中,不平衡有功及无功电流分别反映了负荷各相阻性及感性分量与等效平衡阻性及感性分量之间的差异。本场景虽然不含非线性负荷,但由于畸变电压导致负荷电流也产生了畸变,因此本场景下空电流不为 0。本场景下基于 CPT 得到的各分解电流也两两正交,部分结果如附录 C 图 C14 所示。

事实上,若对本场景系统电压及负荷电流采用快速傅里叶变换分析,则可以发现本场景下负荷电流与电压一样也仅含有 5 次谐波。在 CPT 早期定义中,将空电流还分解为杂散有功电流  $i_{sa}$ 、杂散无功电流  $i_{sr}$  及负荷生成电流  $i_g$ ,三者相互正交<sup>[20]</sup>。其中杂散有功 / 无功电流反映不同谐波次数下各等效电导 / 无功性之间的差异,负荷生成电流反映仅由负荷而非电压引起的电流谐波畸变。在本场景下,负荷生成电流  $i_g=0$ ,表示电流谐波畸变仅与非正弦电压相关。随着 CPT 在功率补偿及控制领域应用的不断发展,借助于频域分析对空电流进一步分解的必要性逐渐降低。近年来的相关研究基本不再对空电流进行分解,仅在利用 CPT 详细分析电路现象、源荷谐波责任划分等少数应用场合使用。

本场景下基于 IRPT 及 CPT 分解得到的各子电流之和也均可还原原电流,如附录 C 图 C15 所示。

### 3.4 场景 4:含非正弦电压、不平衡及非线性负荷

本节构建了含非正弦畸变电压、不平衡及非线性负荷场景,该场景可能在未来尤其是微电网边界内高比例可再生能源及电力电子设备渗透背景下普遍存在,系统结构与参数分别如附录 C 图 C16 与表 C3 所示。

本场景下的系统电压、电流波形如附录 C 图 C17 所示。由图可见,本场景下的电压波形与场景 3 下一致,三相电流因电压非正弦及不平衡、负荷非线性而发生畸变与不平衡,且因负荷中存在感性负荷,各相电压均超前电流一定相位。

本场景下基于 IRPT 及 CPT 的电流分解结果分别如附录 C 图 C18、C19 所示。由图 C18 可见,场景 4 中基于 IRPT 得到的平均有功电流与电压同相位,负责从“源”向“荷”单向传送功率,但是二者波形不同,原因与场景 3 相同,即均是由电压非正弦畸变所致。本场景中,振荡电流不为 0,说明负荷存在不对称或 / 和非线性分量,但 IRPT 无法进一步将不对称及非线性分量进行分解。由图 C19 可见,CPT 各相平衡有功电流与电压、平衡无功电流与电压同源积分波形分别同相位且成比例。平衡有功及无功电流分别反映了负荷中的平衡线性阻性和感性分量。CPT 可进一步将负荷不平衡及非线性特性分离,其中不平衡有功及无功电流分别反映负荷各相阻性及

感性分量同等效平衡阻性及无功性之间的差异。因本场景负荷包含非线性负荷,且电压存在畸变,因此空电流不为0。且若将空电流进一步分解可发现与场景3中负荷生成电流为0情况不同,本场景中负荷生成电流不为0,表明负荷对电流畸变也有贡献。本场景中非有功电流反映了负荷不平衡、无功性及非线性。本场景下CPT各分解电流也两两正交,部分结果如附录C图C20所示。本场景下IRPT及CPT各相子电流之和也均可还原原电流,如附录C图C21所示。

#### 4 结论

本文通过构建4种典型场景,对基于IRPT及CPT非正弦电压或/和不平衡、非线性负荷条件下的电路分析结果进行综合比较,分析二者联系与不同,为2种功率理论应用领域与场景选择提供参考依据,所得结论如下。

1)正弦电压条件(场景1、2)下,不管负荷如何,基于IRPT得到的平均有功/无功电流及CPT平衡有功/无功电流结果均相同,平均/平衡有功电流与电压同相位且波形成比例,平均/平衡无功电流滞后电压 $90^\circ$ ,分别反映系统平衡线性(基波)阻性和无功性(本文中为感性)分量。

2)而在非正弦电压条件(场景3、4)下,因电压非正弦畸变,导致基于IRPT得到的平均有功电流也出现畸变,与电压波形不再一致,且平均有功/无功电流结果同采用的低通滤波器性能关系密切。CPT平衡有功/无功电流计算涉及平均值和有效值,不管电压波形如何,计算系数均为常数,故平衡有功电流始终跟踪电压波形,平衡无功电流始终跟踪电压同源积分。

3)IRPT振荡电流反映了负荷不平衡与非线性综合效应,在负荷存在不平衡或/和非线性时,振荡电流均不为0,IRPT不可进一步将二者影响分离(场景1—4);CPT可分离负荷不平衡与非线性特性,分别由不平衡电流及空电流体现。

4)在非正弦电压带线性(场景3)及非线性(场景4)负荷情形下,基于CPT得到的负荷空电流不等于0。可进一步将空电流分解为杂散有功电流、杂散无功电流及负荷生成电流。场景3中负荷生成电流为0,反映负荷电流谐波畸变仅与电压相关;而场景4中负荷生成电流不为0,反映负荷电流谐波畸变不仅与电压相关,也同负荷相关。

综上所述,CPT较IRPT而言具有更广的应用场景,在非正弦、不平衡/非线性场景下均能很好地对负荷电流提取、分解成与负荷特性相关的电流,且各电流彼此正交,可灵活选取电流组合用于功率补偿与功率控制中的参考电流生成;而传统IRPT仅在正

弦电压条件下可有效提取负荷平均有功/无功电流,且无法将不平衡与非线性特性从其振荡电流中提取出来。通过详细对比研究可以发现,与IRPT相比,CPT能全面地分解负荷电流以解释电路有功传输、无功消耗、谐波污染、负荷不平衡等物理现象。作为一种新型时域功率理论,CPT在未来电力系统转型升级中的负荷特征识别、电费计量、滤波补偿、功率变换器控制等领域有着广阔应用前景。

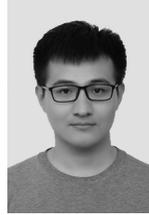
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

#### 参考文献:

- [1] GODOY S M, HARIRCHI F, BABAKMEHR M. Survey on time-domain power theories and their applications for renewable energy integration in smart-grids[J]. IET Smart Grid, 2019, 2(4):491-503.
- [2] ZENG Zeng, YANG Huan, TANG Shengqing, et al. Objective-oriented power quality compensation of multifunctional grid-tied inverters and its application in microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3):1255-1265.
- [3] 肖湘宁, 罗超, 陶顺. 电气系统功率理论的发展与面临的挑战[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9):1-10.  
XIAO Xiangning, LUO Chao, TAO Shun. Development and challenges of power theory in electrical power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9):1-10.
- [4] 陈强, 章心因, 吕干云. 孤岛微电网逆变器不平衡负载下的控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2):124-130.  
CHEN Qiang, ZHANG Xinyin, LÜ Ganyun. Control strategy of inverter for islanded microgrid with unbalanced load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2):124-130.
- [5] 王振浩, 赵东争, 庞丹, 等. 用于电能质量治理的三电平变流器预测无差拍重复控制优化及性能分析[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6):121-128.  
WANG Zhenhao, ZHAO Dongzheng, PANG Dan, et al. Optimization and performance analysis of predictive dead-beat repetitive control of three-level converter for power quality improvement[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6):121-128.
- [6] 赵伟, 姜飞, 涂春鸣, 等. 电动汽车充电站入网谐波分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11):61-66.  
ZHAO Wei, JIANG Fei, TU Chunming, et al. Harmonic currents of grid-connected EV charging station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11):61-66.
- [7] DIMITRI J. Budeanu's concept of reactive and distortion power revisited[C]//2015 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation(ISNCC). Lagow, Poland:IEEE, 2015:1-6.
- [8] SHEPHERD W, ZAKIKHANI P. Suggested definition of reactive power for nonsinusoidal systems[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1972, 119(9):1361.
- [9] SHARON D. Reactive-power definitions and power-factor improvement in nonlinear systems[J]. IET Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1973, 120(6):704-706.
- [10] IEEE. IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions:IEEE Std 1459-2010[S]. New York, USA:IEEE, 2010.
- [11] CZARNECKI L S. Considerations on the reactive power in nonsinusoidal situations[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1985, 34(3):399-404.

- [12] MENTI A,ZACHARIAS T,MILIAS-ARGITIS J. Geometric algebra; a powerful tool for representing power under nonsinusoidal conditions[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I:Regular Papers,2007,54(3):601-609.
- [13] FRYZE S. Active, reactive, and apparent power in non-sinusoidal systems[J]. Przegląd Elektrot,1931,7:193-203.
- [14] DEPENDROCK M. The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1993,8(2):381-387.
- [15] AKAGI H,KANAZAWA Y,NABAE A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1984,IA-20(3):625-630.
- [16] TENTI P,PAREDES H K M,MATTAVELLI P. Conservative power theory, a framework to approach control and accountability issues in smart microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(3):664-673.
- [17] DING Yong,MAO Meiqin,CHANG Liuchen. Conservative power theory and its applications in modern smart grid: review and prospect[J]. Applied Energy,2021,303(117617):1-25.
- [18] KUKAČKA L,KRAUS J,KOLÁŘ M, et al. Review of AC power theories under stationary and non-stationary, clean and distorted conditions[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2016,10(1):221-231.
- [19] DEPENDROCK M. The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1993,8(2):381-387.
- [20] TENTI P,PAOLO M,ELISABETTA T. Compensation techniques based on reactive power conservation[J]. Electrical Power Quality Utilisation,2007,13(1):17-24.

#### 作者简介:



丁勇

丁勇(1991—),男,博士研究生,主要研究方向为微电网逆变器控制(**E-mail**: yong\_dsyuct@163.com);

茆美琴(1961—),女,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为微电网运行控制与能量管理、电动汽车与电网互动(**E-mail**: mmqmail@163.com)。

(编辑 任思思)

## Comparison and analysis of CPT- and IRPT-based current decomposition in multi-scenario

DING Yong, MAO Meiqin

(Photovoltaic System Research Center of Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** The development of new-type power system with renewable energy as the main body puts forward new requirements for metering devices and power conversion equipment. Innovative power theory is required to devise and control the devices to adapt to various electrical system structures. The similarities and discrepancies of conservative power theory (CPT) and instantaneous reactive power theory (IRPT) in current decomposition for different scenarios are discussed by establishing multiple three-phase electrical power system scenarios consisting of different sources and loads. The results show that IRPT can obtain satisfying outcomes only in sinusoidal voltage cases. Based on CPT current decomposition, it can better explain the power transmission phenomenon and analyze the load characteristics under various voltage and load conditions. As a result, the CPT shows a promising potential in load characteristic identification, electricity metering, filtering and compensation, power converter control and so on.

**Key words:** non-sinusoidal voltage; unbalanced load; instantaneous reactive power theory; conservative power theory; current decomposition

附录 A 正文中相关附图

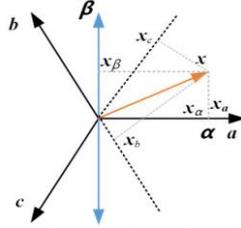


图 A1 abc 坐标系与 aβ 坐标系变换关系示意图

Fig.A1 Relationship between abc and aβ coordinate systems

附录 B 数学预备

B1 基本运算

假设  $x(t)$ 、 $y(t)$  为周期为  $T$  的时变函数，作如下定义。

$$\text{平均值: } \bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x dt$$

$$\text{有效值: } X = \|x\| = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt}$$

$$\text{内积: } \langle x, y \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T xy dt$$

$$\text{正交: } \langle x, y \rangle = 0$$

在单相系统中，若电压及电流为周期为  $T$  的时变函数，基于上述数学运算及正式(4)–(6)中的定义，即可计算获得单相 CPT 分解得到的负荷电流各电流分量。

假设向量  $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{y}$  分别含有  $N$  个元素，且各元素均为周期为  $T$  的时变函数，即：

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T, \quad \mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$$

对于含  $N$  个元素的向量  $\mathbf{x}$  及  $\mathbf{y}$ ，定义：

$$\text{标量积: } \mathbf{x} \bullet \mathbf{y} = \sum_{k=1}^N x_k y_k$$

集合有效值：

$$X_{\text{col}} = \|\mathbf{x}\| = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left( \frac{1}{T} \int_0^T x_k^2 dt \right)} = \sqrt{\sum_{k=1}^N X_k^2}$$

内积：

$$\langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle = \langle \mathbf{x} \bullet \mathbf{y} \rangle = \sum_{k=1}^N \langle x_k, y_k \rangle = \sum_{k=1}^N \frac{1}{T} \int_0^T x_k y_k dt$$

$$\text{正交: } \langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle = \langle \mathbf{x} \bullet \mathbf{y} \rangle = 0$$

式中， $k=1, 2, \dots, N$ 。在三相系统中，若三相电压向量及电流向量均含有 3 个周期为  $T$  的元素，基于上述数学运算及正式(7)、(8)中的定义，即可计算获得三相 CPT 分解得到的负荷电流各电流分量。

B2 正弦线性条件下 CPT 功率定义与传统功率定义一致性

单相 CPT 中，定义系统有功功率  $P$  及无功能量  $W$  为：

$$\begin{cases} P_{1\phi} = \langle v, i \rangle \\ W_{1\phi} = \langle \hat{v}, i \rangle \end{cases} \quad (\text{B1})$$

考虑单相正弦线性电路，假设系统电压  $v(t)$  及电流  $i(t)$  分别为：

$$\begin{cases} v(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t + \gamma) \\ i(t) = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \delta) \end{cases} \quad (\text{B2})$$

式中： $V$ 、 $I$  分别为电压有效值、电流有效值； $\gamma$ 、 $\delta$  分别是电压及电流的相位角。

电压、电流同源变量分别为：

$$\begin{cases} \hat{v}(t) = -\sqrt{2}V \cos(\omega t + \gamma) \\ \hat{i}(t) = -\sqrt{2}I \cos(\omega t + \delta) \end{cases} \quad (\text{B3})$$

根据式(B1)，分别对原始电压及电压同源积分分量与电流进行内积计算，得到基于 CPT 的单相正弦电流有功功率及无功能量分别为：

$$P_{1\phi} = \langle v, i \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T vidt = VI \cos \varphi \quad (\text{B4})$$

$$W_{1\phi} = \langle \hat{v}, i \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{v}idt = VI \sin \varphi \quad (\text{B5})$$

式中： $\varphi = \gamma - \delta$ ，为电压与电流间的相位差。

式 (B4)、(B5) 表明：单相正弦线性条件下，单相 CPT 定义的有功功率与无功能量分别与传统单相电路功率理论的有功功率及无功功率定义一致。传统单相电路功率理论可视为单相 CPT 理论的特例。

三相 CPT 中，定义系统有功功率及无功能量为：

$$\begin{cases} P_{3\phi} = \langle \vec{v}, \vec{i} \rangle = \sum_{n=1}^3 P_n \\ W_{3\phi} = \langle \vec{\hat{v}}, \vec{i} \rangle = \sum_{n=1}^3 W_n \end{cases} \quad (\text{B6})$$

易得三相对称正弦电压带平衡负荷情况下，CPT有功功率及无功功率分别为：

$$P_{3\phi} = \langle \vec{v}, \vec{i} \rangle = 3VI \cos \varphi \quad (B7)$$

$$W_{3\phi} = \langle \vec{v}, \vec{i} \rangle = 3VI \sin \varphi \quad (B8)$$

式 (B7)、(B8) 表明：三相对称正弦电压带平衡负荷情况下，CPT 定义的有功功率与无功功率分别同传统三相电路功率理论的有功功率及无功功率定义一致。

### 附录 C 补充结果

#### 1) 场景 1 补充结果。

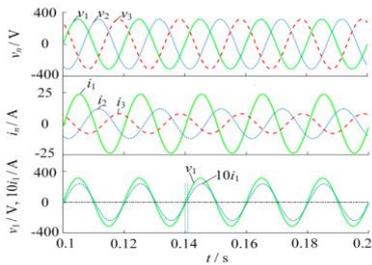


图 C1 场景 1 电压与电流波形

Fig.C1 System voltages and currents in Scenario 1

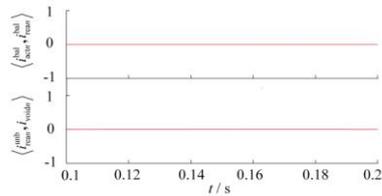


图 C2 场景 1 相关电流内积

Fig.C2 Internal products of currents in Scenario 1

#### 2) 场景 2 补充结果。

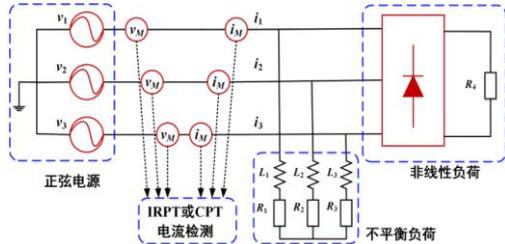


图 C3 场景 2 系统结构

Fig.C3 Structure of system in Scenario 2

表 C1 场景 2 系统参数

Table C1 System parameters in Scenario 2

电源电压/V	不平衡负荷	非线性负荷
$v_1=311\sin(\omega t)$	$R_1=13\Omega, L_1=5\text{mH}$	不控整流器
$v_2=311\sin(\omega t-120^\circ)$	$R_2=26\Omega, L_2=3\text{mH}$	及
$v_3=311\sin(\omega t+120^\circ)$	$R_3=39\Omega, L_3=1\text{mH}$	$R_4=50\Omega$

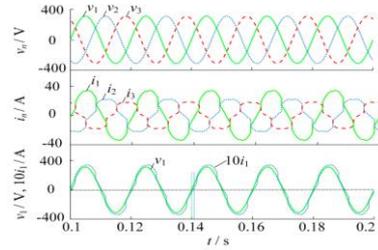


图 C4 场景 2 下的电压与电流波形

Fig.C4 System voltages and currents in Scenario 2

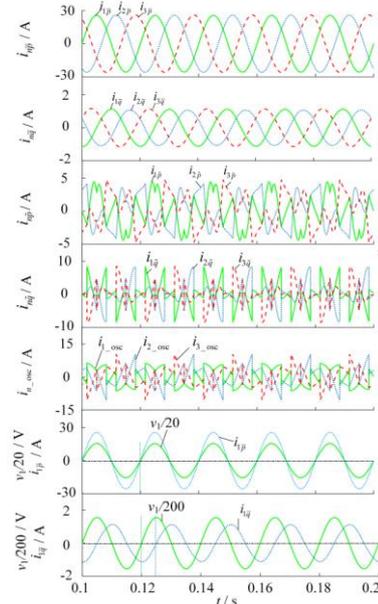


图 C5 场景 2 基于 IRPT 的电流分解结果

Fig.C5 Current decomposition results based on IRPT in Scenario 2

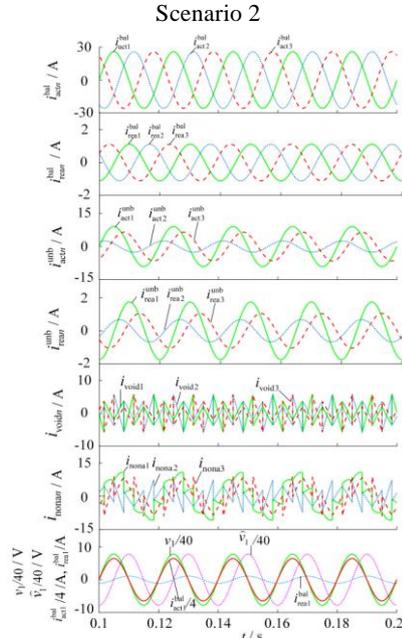


图 C6 场景 2 下基于 CPT 的电流分解结果

Fig.C6 Current decomposition results based on CPT in Scenario 2

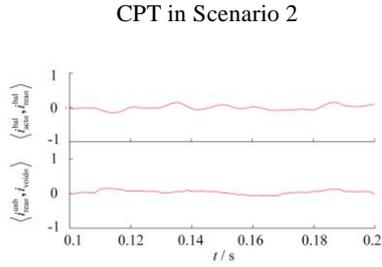


图 C7 场景 2 下相关电流内积  
Fig.C7 Internal products of currents in Scenario 2

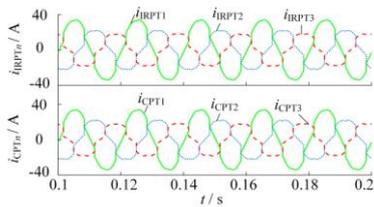


图 C8 场景 2 下基于 IRPT、CPT 的各分解电流之和  
Fig.C8 Sums of decomposed currents based on IRPT and CPT in Scenario 2

3) 场景 3 补充结果。

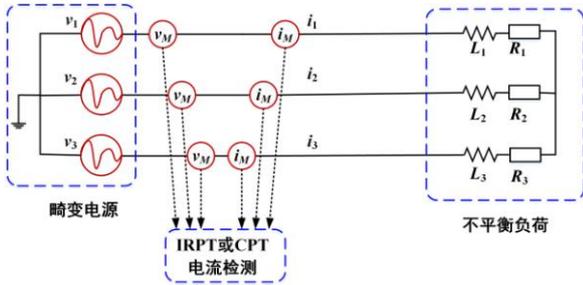


图 C9 场景 3 系统结构  
Fig.C9 Structure of system in Scenario 3  
表 C2 场景 3 系统参数  
Table C2 System parameters in Scenario 3

电源电压/V	不平衡负荷
$v_1=311\sin(\omega t)+31.1\sin(5\omega t)$	$R_1=13\Omega, L_1=5\text{mH}$
$v_2=248.8\sin(\omega t-120^\circ)+24.88\sin(5\omega t+120^\circ)$	$R_2=26\Omega, L_2=3\text{mH}$
$v_3=279.9\sin(\omega t+120^\circ)+27.99\sin(5\omega t-120^\circ)$	$R_3=39\Omega, L_3=1\text{mH}$

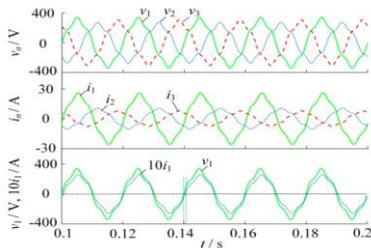


图 C10 场景 3 下的电压与电流波形  
Fig.C10 System voltages and currents in Scenario 3

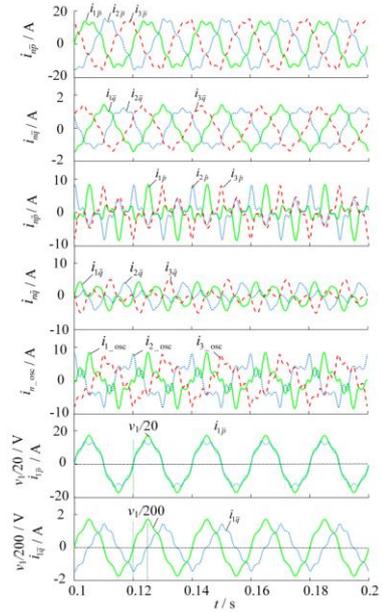


图 C11 场景 3 下基于 IRPT 的电流分解结果  
Fig.C11 Current decomposition results based on IRPT in Scenario 3

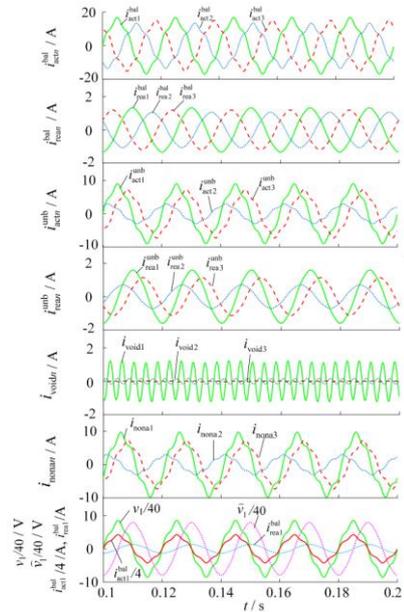


图 C12 场景 3 下基于 CPT 的电流分解结果  
Fig.C12 Current decomposition results based on CPT in Scenario 3

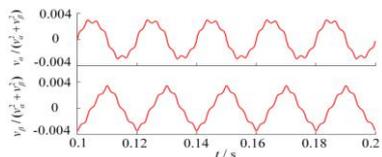


图 C13 场景 3 下的  $v_{\alpha\beta}/v_\alpha^2+v_\beta^2$   
Fig.C13  $v_{\alpha\beta}/v_\alpha^2+v_\beta^2$  in Scenario 3

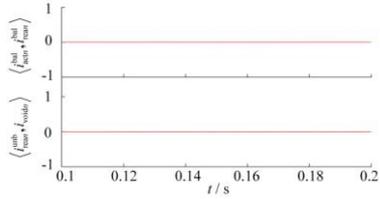


图 C14 场景 3 下的相关电流内积  
Fig.C14 Internal products of currents in Scenario 3

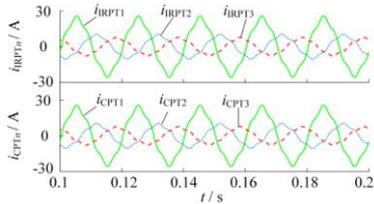


图 C15 场景 3 下基于 IRPT、CPT 得到的各分解电流之和  
Fig.C15 Sums of decomposed currents based on IRPT and CPT in Scenario 3

4) 场景 4 补充结果。

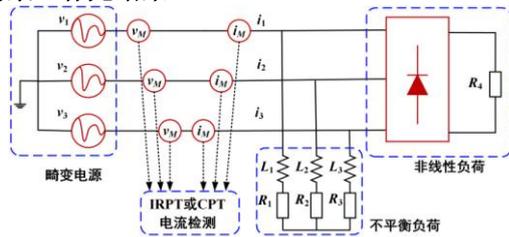


图 C16 场景 4 系统结构

Fig.C16 Structure of system in Scenario 4

表 C3 场景 4 系统参数

Table C3 System parameters in Scenario 4

电源电压/V	不平衡负荷	非线性负荷
$v_1=311\sin(\omega t)+31.1\sin(5\omega t)$	$R_1=13\Omega, L_1=5\text{mH}$	不控整流器 及 $R_4=50\Omega$
$v_2=248.8\sin(\omega t-120^\circ)+24.88\sin(5\omega t+120^\circ)$	$R_2=26\Omega, L_2=3\text{mH}$	
$v_3=279.9\sin(\omega t+120^\circ)+27.99\sin(5\omega t-120^\circ)$	$R_3=39\Omega, L_3=1\text{mH}$	

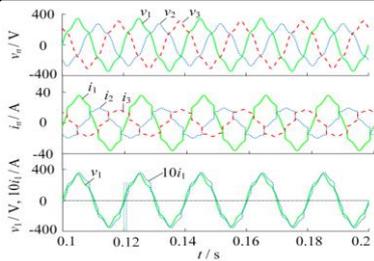


图 C17 场景 4 下的系统电压与电流波形  
Fig.C17 System voltages and currents in Scenario 4

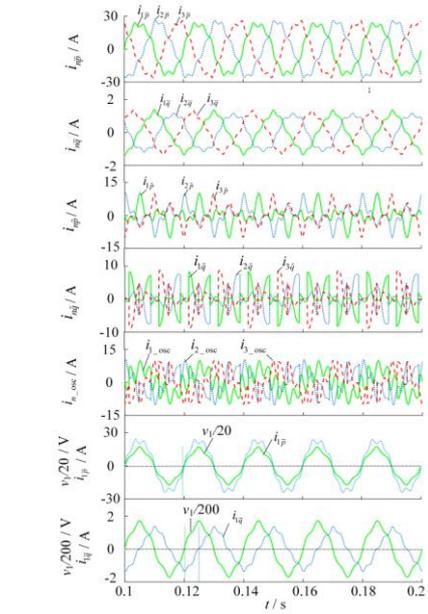


图 C18 场景 4 下基于 IRPT 的电流分解结果  
Fig.C18 Current decomposition results based on IRPT in Scenario 4

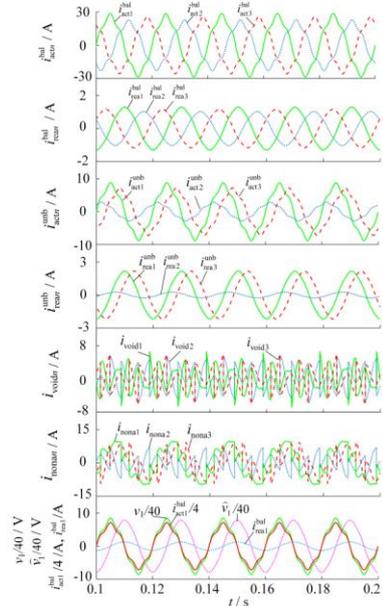


图 C19 场景 4 下基于 CPT 的电流分解结果  
Fig.C19 Current decomposition results based on CPT in Scenario 4

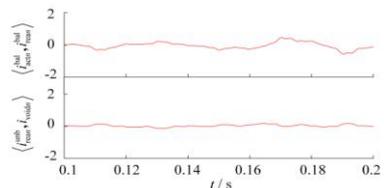


图 C20 场景 4 相关电流内积  
Fig.C20 Internal products of currents in Scenario 4

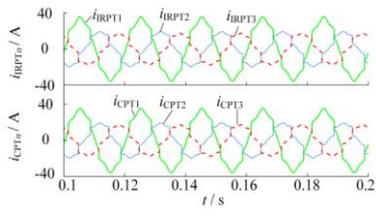


图 C21 场景 4 下基于 IRPT、CPT 得到的各分解电流之和  
Fig.C21 Sums of decomposed currents based on IRPT and CPT  
in Scenario 4