

# PCC处谐波分析的新方法

陈彬<sup>1</sup>,唐云龙<sup>2</sup>,徐立明<sup>2</sup>,张红跃<sup>2</sup>

(1.深圳工程质量监督检验站,广东 深圳 518081; 2.许继日立有限公司,河南 许昌 461000)

摘要: 为了正确辨识系统侧和用户侧在公共耦合节点(PCC)处所贡献的谐波分量,正确地认识公共耦合节点处的谐波,提出了一种新的谐波成份分析方法和改进的等效诺顿模型。结合了具体化的情况,对PCC节点处的谐波成份作了详尽的分析,这为对产生谐波的用户进行管理提供了一定的依据。

关键词: PCC节点; 谐波; 诺顿模型

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)09-0060-04

## 0 引言

近年来,随着大量电力电子装置投入使用,以及其它一些非线性负荷在电力系统中的出现,越来越多的谐波被注入到电力系统中,造成电流和电压的波形畸变越来越严重,严重干扰了系统的正常运行。在我国,研究电力系统的谐波问题也逐渐普及开来<sup>[1~3]</sup>。

## 1 PCC处谐波贡献量分析方法中的问题

为了尽可能限制和减少谐波的污染,最近有关文献提出了一种办法<sup>[4]</sup>,即根据系统和用户产生谐波量的大小和性质来确定是否采取相应的措施,即采取所谓的激励机制。因此,必须对联系系统侧和用户侧母线(PCC)<sup>[5]</sup>处的谐波做详尽的分析,以确定谐波的大小和性质。为了对系统和用户在PCC处产生的谐波进行定量的分析,文献[4~7]提出了一些方法和模型,综合来看,还存在着一些问题。其一,由于忽视了系统和用户产生谐波的性质以及相互之间的作用效果,使得所导出的各自谐波贡献量具有一定的不合理成份;其二,对用到的某些等效变换电路还需做进一步分析,同时,上述文献的这些方法都没有完全定义公共耦合节点处(PCC)的谐波成份,没有把系统和用户各自的谐波贡献量区分开来。

针对这个问题,本文在充分考虑系统和用户产生谐波的性质和相互作用的基础上,提出了一种改进的诺顿等效模型和相应的谐波分析方法来分析公共耦合节点处的谐波成份。即该方法把公共耦合节点处的谐波电流或谐波电压划分成六类:

- 1) 用户在参考工作状况下产生的谐波;
- 2) 系统在参考工作状况下产生的谐波;
- 3) 用户因系统的影响而产生的附加谐波;

- 4) 系统因用户的影响而产生的附加谐波;
- 5) 系统因自身的影响而产生的附加谐波;
- 6) 用户因自身的影响而产生的附加谐波。

注:参考工作状况即用户和系统处的等效谐波阻抗均为已定的参考谐波阻抗时的工作状况,相关文献[5~9]中已有说明。

因此,判定用户和系统在公共耦合点处产生谐波的大小和性质即谐波贡献量应从以上六个方面来考虑,同时制定激励机制也应考虑这六个方面的因素,即要考虑到接点两侧的相互影响。

## 2 PCC处谐波分析

本文借鉴了在文献[5~7]中提出的诺顿等效模型,如图1所示。

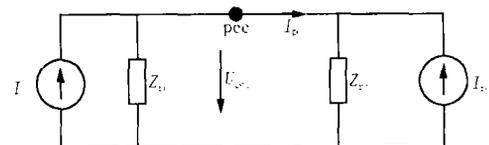


图1 谐波分析的诺顿等效电路

Fig 1 Norton equivalent circuit for harmonic analysis

图1中的各参数的定义如下:

$I_u$ 、 $I_s$ 为系统和用户处在参考工作状况下产生的谐波电流;  $Z_u$ 、 $Z_s$ 为系统和用户的参考谐波阻抗;  $I_{pcc}$ 、 $U_{pcc}$ 为PCC处的谐波电流、电压。

图1中的各参数是相对于 $Z_u$ 、 $Z_s$ 而言的,为了能更好地进行下述问题的讨论,又新定义了其它参数如下:

$I_{uc}$ 为因用户处的因素而使系统产生的额外谐波电流分量,受用户控制;

$I_{sc}$ 不因系统的因素而使用户产生的额外谐波电流分量,受系统控制;

$I_{uu}$ 为系统本身的因素而使系统产生的额外谐波电流分量;

$I_{cc}$ 为用户本身的因素而使用户产生的额外谐波电流分量;

$Z_u$ 、 $Z_c$ 为系统和用户侧变化后的实际谐波阻抗;

因此 PCC 处的谐波电流  $I_{pcc}$  就应该是  $I_{ru}$ 、 $I_{rc}$ 、 $I_{uc}$ 、 $I_{uu}$ 、 $I_{cc}$  中的一些或全部的相量叠加和。现讨论如下。

2.1  $Z_u$  等于  $Z_{ru}$  和  $Z_c$  等于  $Z_{rc}$

由图 1, 根据叠加原理, 系统和用户在 PCC 处贡献的谐波电流分量就可以用下面两个方程来描述:

$$I_{u-pcc} = \frac{Z_{ru}}{Z_{rc} + Z_{ru}} I_{ru} \quad (1)$$

$$I_{c-pcc} = \frac{Z_{rc}}{Z_{rc} + Z_{ru}} I_{rc} \quad (2)$$

上面两个方程式可以用图 2 直观表示出来。

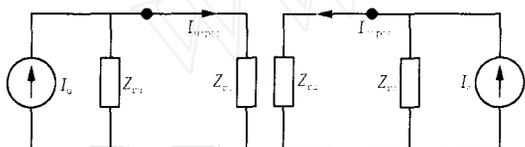


图 2 用户和系统谐波贡献量

Fig 1 Harmonic contribution of utility and customer

所以可得 PCC 处的谐波电流表达式:

$$I_{pcc} = I_{u-pcc} + (-I_{c-pcc}) \quad (3)$$

为了更能形象的表示出贡献量的大小, 可以把  $I_{pcc}$  表示成两个标量相加的表达式:

$$|I_{pcc}| = I_{cf} + I_{uf} \quad (4)$$

式中:  $I_{cf}$ 、 $I_{uf}$  分别为  $I_{c-pcc}$ 、 $I_{u-pcc}$  在  $I_{pcc}$  上的投影, 可用向量图表达出来。

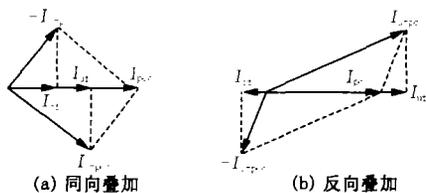


图 3 PCC 处谐波电流向量图

Fig 3 Vector diagram of harmonic current on PCC

由图 3(a)、(b) 可以清楚地看出系统和用户在 PCC 处的谐波贡献水平, 即  $I_{cf}$ 、 $I_{uf}$  在  $I_{pcc}$  上所占的比例大小。  $I_{cf}$ 、 $I_{uf}$  是可以同向也可以反向的, 它们当中和  $I_{pcc}$  方向相反的量表明了其对 PCC 节点处的谐波电流起削弱作用。

2.2  $Z_u$  偏离  $Z_{ru}$ 、 $Z_c$  等于  $Z_{rc}$

系统中出现投切负荷、补偿装置以及其它一些情况时,  $Z_{ru}$  就会变为  $Z_u$ ,  $Z_u$  有可能比  $Z_{ru}$  大也有可

能小。同时系统产生的谐波电流就由  $I_{ru}$  变为  $I_u$ , 而用户因受到系统的影响使得  $I_{rc}$  变为  $I_c$ 。可以认为  $I_c$  是由  $I_{rc}$  和  $I_{cu}$  叠加而成,  $I_u$  是由  $I_{ru}$  和  $I_{uu}$  叠加而成, 用公式表示为:

$$I_u = I_{ru} + I_{uu} \quad (5)$$

$$I_c = I_{rc} + I_{cu} \quad (6)$$

其中:  $I_{uu}$  为对应于引言中所划分六类谐波中 5);

$I_{cu}$  为对应于引言中所划分六类谐波中 3), 受系统控制;

$I_u$  为变化后系统处的实际谐波电流;

$I_c$  为变化后用户处的实际谐波电流。

因此  $I_{pcc}$  就相当于  $I_{ru}$ 、 $I_{uu}$ 、 $I_{rc}$ 、 $I_{cu}$  这四个相量的叠加。于是图 1 就被改进成为图 4 形式:

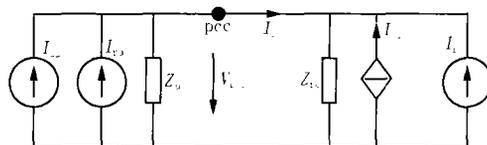


图 4  $Z_{ru}$  变化  $Z_{rc}$  恒定的诺顿等效电路

fig 4 Norton equivalent circuit for varying  $Z_{ru}$  and constant  $Z_{rc}$

因为图 4 反应的是  $Z_{ru}$  变化为  $Z_u$  而  $Z_{rc}$  恒定的情况, 因此可以把系统侧的谐波电流  $I_{ru}$ 、 $I_{uu}$  合并为  $I_u$ , 以此来作为系统对 PCC 处的贡献量, 这是因为系统侧的谐波电流是完全由系统自己引起的。对于用户侧的谐波电流  $I_{rc}$ 、 $I_{cu}$ , 则不能把它们简单地叠加成  $I_c$  并以此作为用户对 PCC 处的谐波贡献量的衡量标准, 因为  $I_{cu}$  完全是因为系统的原因造成的, 它应该由系统而不应由用户来负责。  $I_{cu}$  的产生不仅和系统的谐波参数有关还和系统的基波参数有关, 可以认为由系统所控制, 因此把它当作受控源来处理。所以用户和系统在 PCC 处的谐波电流贡献量应分

别为:

$$I_{cu-pcc} = \frac{Z_{rc}}{Z_{rc} + Z_u} I_{cu} \quad (7)$$

$$I_{rc-pcc} = \frac{Z_{rc}}{Z_{rc} + Z_u} I_{rc} \quad (8)$$

$$I_{u-pcc} = \frac{Z_u}{Z_{rc} + Z_u} I_u \quad (9)$$

引用图 2 所示的分析方法, 可得 PCC 处的谐波电流的表达式为。

$$I_{pcc} = I_{cu-pcc} + (-I_{rc-pcc}) + (-I_{u-pcc}) \quad (10)$$

综上所述, 图 4 就变换为图 5 形式。

为了能更清楚地得到每个谐波相量在  $I_{pcc}$  上的投影从而知道系统和用户的责任所在, 现综合图 4 和图 5 将其中的量用相量图的形式表达出来如图 6 所示。

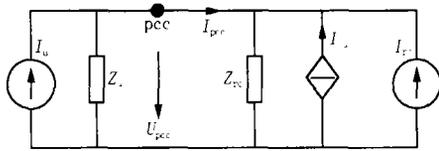


图 5 图 4 等效的变换电路

Fig 5 Converting equivalent circuit of Fig 4

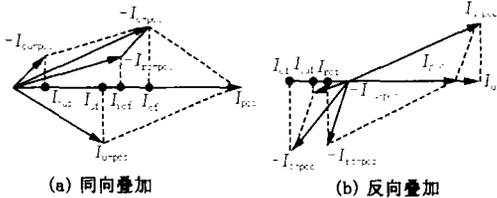


图 6 PCC 处谐波电流相量图

Fig 6 Phasor diagram of harmonic current on PCC

图 6 和图 3 所表达的意思类似。参照对图 3 的描述就可以明白图 6 中各个量所要表达的含义。

本文在这里提出的另外一个方法就是要把  $I_{cu}$  这一受控源完全移到系统侧以表明系统因自身的变化所承担的责任。

$I_{cu}$  在用户侧时对 PCC 处的谐波贡献量为 (7) 式, 假设  $I_{cu}$  移到系统侧后其值变为  $I'_{cu}$ , 那么  $I_{cu}$  在 PCC 处的贡献量应等于式 (7), 于是就可得:

$$\frac{Z_{rc}}{Z_{rc} + Z_u} I_{cu} = - \frac{Z_u}{Z_u + Z_{rc}} I'_{cu} \quad (11)$$

从而  $I'_{cu}$  应为:

$$I'_{cu} = - \frac{Z_{rc}}{Z_u} \cdot I_{cu} \quad (12)$$

所以图 5 就变换成了图 7 如下:

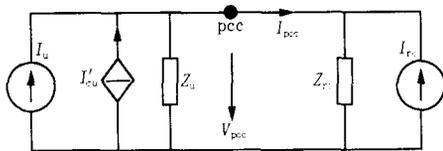


图 7 改进的诺顿等效变换电路 1

Fig 7 Advanced Norton convert equivalent circuit No 1

根据图 7 和图 5 所计算出的效果是等同的, 但图 7 更加直观, 它完全体现出了变化一方的责任。

### 2.3 其它情况分析

本文限于篇幅, 就不再对其它两种情况进行具体的分析, 分析的方法和步骤和 2.2 节相同。这两种情况就是  $Z_c$  偏离  $Z_{rc}$ ,  $Z_u$  等于  $Z_{ru}$  以及  $Z_c$  偏离  $Z_{rc}$  及  $Z_u$  偏离  $Z_{ru}$ 。

## 3 求解问题的步骤及算例分析

### 3.1 求解问题的步骤

综合上面所述, 对 PCC 处的谐波进行分析时可遵循下列步骤, 归纳如下:

- 1) 根据文献提供的方法和标准获得参考阻抗  $Z_{ru}, Z_{rc}$ 。
- 2) 测量或计算出 PCC 点处的谐波电流  $I_{pcc}$  和谐波电压  $U_{pcc}$ 。
- 3) 针对不同的变化情况, 根据对应的等效电路求出各谐波电流成分  $I_{rc-pcc}, I_{ru-pcc}, I_{uc-pcc}, I_{cu-pcc}$ 。
- 4) 求出各谐波量在  $I_{pcc}$  上的投影分量。
- 5) 确定系统和用户各自谐波分量的贡献量大小, 为文中所提到的激励机制的实施提供客观依据。

### 3.2 简单算例分析

下面引用一个简单算例<sup>[7]</sup>对上面的分析方法对 PCC 处的谐波进行分析。为简单起见, 本算例仅仅只针对某一次谐波分量进行分析, 基本数据做假设如下:

$Z_{ru} = 1 + j8; Z_{rc} = 5 + j35; I_c = 3 \angle 0^\circ; I_u = 1 \angle 0^\circ$  (针对  $I_c$  和  $I_u$  在 PCC 处相互削减的情况);  $I_u = 1 \angle 180^\circ$  (针对  $I_c$  和  $I_u$  在 PCC 处相互叠加的情况)。假设系统侧谐波阻抗的每变化 10% 则用户处的产生谐波量就反向变化 1%, 同理用户处谐波阻抗的每变化 10% 则系统侧产生谐波量就反向变化 0.5%, 具体计算过程忽略, 有关计算结果如下 (所有涉及到的变化均为幅值发生变化)。

表 1 表明的是用户处谐波源的谐波含量发生变化而导致的一些变化情况。谐波源的谐波量相对于基准值 (100%) 从 20% 到 300% 之间变化, 而系统侧和用户侧的谐波阻抗皆不发生变化。可以看出系统侧的谐波贡献量  $I_{ru}$  在整个变化过程中保持恒定不变, 而用户侧贡献的谐波含量则随着其谐波源谐波量的增加而增加, 用户应对所增加的谐波量负责。

表 2 表明的是系统侧的谐波阻抗发生变化而导致的一些变化情况。系统侧的谐波阻抗相对于基准值 (100%) 在 20% 到 300% 之间变化, 而用户侧的谐波阻抗不发生变化。从表 2 中的计算结果可以看出系统侧谐波阻抗变化对用户侧产生谐波贡献量的影响。

表 3 表明的是用户侧的谐波阻抗发生变化而导致的一些变化情况。系统侧的谐波阻抗相对于基准值 (100%) 在 20% 到 300% 之间变化, 而系统侧谐波阻抗不发生变化。从表 3 中的计算结果可以看出用户侧谐波阻抗变化对系统侧产生谐波贡献量的影响。

表 1 用户处谐波源变化

Tab 1 Varying customer harmonic sources

| $I_c$                       | $I_{pcc}$ | $I_{uf}$ | $I_{cf}$ |
|-----------------------------|-----------|----------|----------|
| $I_c$ 和 $I_u$ 在 PCC处相互削减的情况 |           |          |          |
| 20%                         | 0.30      | -0.19    | 0.49     |
| 50%                         | 1.04      | -0.19    | 1.22     |
| 100%                        | 2.26      | -0.19    | 2.44     |
| 200%                        | 4.70      | -0.19    | 4.89     |
| 300%                        | 7.14      | -0.19    | 7.33     |
| $I_c$ 和 $I_u$ 在 PCC处相互叠加的情况 |           |          |          |
| 20%                         | 0.67      | 0.19     | 0.49     |
| 50%                         | 1.41      | 0.19     | 1.22     |
| 100%                        | 2.63      | 0.19     | 2.44     |
| 200%                        | 5.07      | 0.19     | 4.89     |
| 300%                        | 7.51      | 0.19     | 7.33     |

表 2 系统侧谐波阻抗变化

Tab 4 Varying utility harmonic impedance

| $Z_u$                       | $I_{pcc}$ | $I_{uf}$ | $I_{cf}$ | $I_{uz}$ | $I_{cz}$ |
|-----------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| $I_c$ 和 $I_u$ 在 PCC处相互削减的情况 |           |          |          |          |          |
| 20%                         | 3.03      | 0.39     | 2.64     | -0.04    | 3.08     |
| 50%                         | 2.71      | 0.15     | 2.56     | -0.10    | 2.81     |
| 100%                        | 2.25      | -0.19    | 2.44     | -0.19    | 2.44     |
| 200%                        | 1.88      | -0.32    | 2.20     | -0.29    | 2.17     |
| 300%                        | 1.34      | -0.61    | 1.95     | -0.38    | 1.72     |
| $I_c$ 和 $I_u$ 在 PCC处相互叠加的情况 |           |          |          |          |          |
| 20%                         | 3.11      | 0.47     | 2.64     | 0.04     | 3.07     |
| 50%                         | 2.91      | 0.35     | 2.56     | 0.10     | 2.81     |
| 100%                        | 2.63      | 0.19     | 2.44     | 0.19     | 2.44     |
| 200%                        | 2.13      | -0.07    | 2.20     | 0.29     | 1.84     |
| 300%                        | 1.72      | -0.23    | 1.95     | 0.38     | 1.34     |

表 3 用户侧谐波阻抗变化

Tab 4 Varying customer harmonic impedance

| $Z_u$                       | $I_{pcc}$ | $I_{uf}$ | $I_{cf}$ | $I_{uz}$ | $I_{cz}$ |
|-----------------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| $I_c$ 和 $I_u$ 在 PCC处相互削减的情况 |           |          |          |          |          |
| 20%                         | 1.05      | -0.20    | 1.25     | -0.42    | 1.47     |
| 50%                         | 1.75      | -0.19    | 1.94     | -0.31    | 2.06     |
| 100%                        | 2.26      | -0.19    | 2.45     | -0.19    | 2.44     |
| 200%                        | 2.56      | -0.20    | 2.76     | -0.11    | 2.67     |
| 300%                        | 2.72      | -0.21    | 2.93     | -0.07    | 2.79     |
| $I_c$ 和 $I_u$ 在 PCC处相互叠加的情况 |           |          |          |          |          |
| 20%                         | 1.88      | 0.20     | 1.68     | 0.42     | 1.46     |
| 50%                         | 2.37      | 0.19     | 2.18     | 0.31     | 2.06     |
| 100%                        | 2.63      | 0.19     | 2.44     | 0.19     | 2.44     |
| 200%                        | 2.78      | 0.20     | 2.60     | 0.11     | 2.67     |
| 300%                        | 2.86      | 0.21     | 2.67     | 0.07     | 2.79     |

## 4 结论

本文综合了各个方面的变化情况,详细地分析了公共耦合节点处的谐波电流成份,对其进行了合理的划分,并因系统和用户的变化重新定义了几种谐波电流。对于公共节点处的谐波电流的分解,本文提出了改进的诺顿等效电路法并作了相关的一部分相量示意图,使得系统或用户的责任变得十分明了。本文的最后给出了分解公共节点处谐波电流的

一般步骤及一个简单算例分析。本文旨在提出一种分析的方法,付诸实施还需做很多的工作。

## 参考文献:

- [1] 程浩忠. 电力系统谐波技术 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1998  
CHENG Hao-zhong Technology of Power System Harmonics [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1998
- [2] 同向前, 薛钧义. 考虑谐波污染时的用户电量的计算 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(22): 53-55.  
TONG Xiang-qian, XUE Jun-yi Consumer Electric Energy Measurement in Consideration of Harmonic Pollution [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 53-55.
- [3] 程浩忠. 电力系统谐波潮流的降维计算方法 [J]. 电力系统自动化, 1996, 20(1): 20-22  
CHENG Hao-zhong Computation Method of Harmonic Power Flow via Reducing Dimension [J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(1): 20-22
- [4] Srinivasan K On Separating Customer and Supply Side Harmonic Contributions [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, (4): 1003-1012
- [5] Emanuel A E On the Assessment of Harmonic Pollution of Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, (7): 1693-1698
- [6] Todde C Identification of Excessive Harmonic Flow in Large Industrial Loads [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, (7): 927-931.
- [7] Xu W. A Method for Determining Customer and Utility Harmonics Contributions at the Point of Common Coupling [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(2).
- [8] IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems [S].
- [9] Mceachem A. A Revenue and Harmonics: an Evaluation of Some Proposed Rate Structures [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, (1): 474-482

收稿日期: 2005-08-22; 修回日期: 2005-11-13

作者简介:

陈彬 (1971-), 男, 本科, 从事的方向为电气工程研究管理工作; E-mail: chbin666@yahoo.com.cn

唐云龙 (1976-), 男, 硕士, 从事电气主设备研究开发工作;

徐立明 (1974-), 男, 本科, 从事电气主设备研究开发工作。

(下转第 86 页 continued on page 86)

其自动化、电力电子技术在电力系统中的应用及其控制技术; Email: epqzhong@scut.edu.cn

张尧(1948-),男,教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统运行与稳定、电力市场、电网规划。

### Review on application and development of modern control technologies in HVDC systems

ZHONG Qing, ZHANG Yao, YANG Jin-ming, WU Zhi-gang, XIONG Wen  
(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The controls of HVDC have an important influence on the security and stability of the power systems. As a strictly nonlinear system, HVDC needs modern control theories to improve the performance of the system. Based on analysis of traditional control strategies, this paper reviews the recent researches of the application of the modern control technologies into the HVDC systems. Every control strategy has its own advantages and defects. The absence of multi-infeed HVDC systems results in many complex problems, such as the electromagnetic coupling between HVDCs and the coordination of the components in the systems. The directions of development and matters with attention are put forward in the final part of the paper.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50337010), Research Fund for Doctoral Program of Higher Education (No. 20020561004), and National Natural Science Youth Foundation of South China University of Technology (No. 5050390).

**Key words:** HVDC; modern control technologies; multi-infeed systems

(上接第 59 页 continued from page 59)

### Voltage-eligibility-rate MIS based on WAN

YANG Yu-qin, LU Guo-xian, QU Ji-fu  
(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** This paper first analyzes the current situation of domestic qualified voltage ratio management information system (MIS) and points out the problems that still exist. The present system cannot satisfy the requirement of openness and security in the wide area network (WAN). This paper develops a new method of voltage qualified rate MIS based on WAN and it also details the system's function and feature. Based on WAN, the qualified voltage ratio data can be reported to leaders, examined and rejected to achieve system data-integration. The design of permission and object-oriented database technique guarantee security of data and openness of the system. The practical running experience indicates that the level of voltage management in power corporations can be improved very much by the system.

**Key words:** WAN; data-integration; MIS

(上接第 63 页 continued from page 63)

### New method for analysing the harmonics on PCC

CHEN Bin<sup>1</sup>, TANG Yun-long<sup>2</sup>, XU Liming<sup>2</sup>, ZHANG Hong-yue<sup>2</sup>  
(1. The Surveillance and Test Station for Project Quality, Shenzhen 518081, China;  
2. XJ-Hitachi Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** To identify the harmonic contribution of utility and customer on PCC correctly, this paper proposes a new decomposition way of harmonic component and an advanced Norton model. This paper details the component of harmonics in PCC with all aspects. It can lay a foundation to manage the customer who yields harmonics.

**Key words:** PCC; harmonic; Norton model