

# 一种无锁相环的单相电路谐波和无功电流检测方法

丁菊霞<sup>1, 2</sup>, 张秀峰<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学峨眉校区, 四川 峨眉山 610042; 2. 西南交通大学, 四川 成都 610031)

**摘要:** 有功电流分离法是近年来出现的一种单相电路谐波和无功电流检测新方法。在电气化铁路中, 电力机车是一个运行的、急剧变化的单相牵引负荷, 当由其引起的电网电压波动较严重时, 可能导致该检测方法中使用的锁相环处于失锁状态而无法进行准确检测。该文对该检测方法进行简化, 提出了一种无锁相环的单相电路谐波和无功电流检测方法。理论分析和仿真证明, 该方法可以实时检测出单相电路谐波和无功电流, 原理简单、易于实现。

**关键词:** 锁相环; 单相电路; 谐波; 无功电流; 实时检测

**中图分类号:** TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)14-0053-05

## 0 引言

在电气化铁道中, 电力机车是一个单相整流型牵引负荷, 三相不对称, 运行时对电网注入了大量的谐波电流, 从而引起电网电压、电流波形畸变, 供电质量恶化, 严重时甚至影响到电力系统的安全运行。

采用有源电力滤波器是当前谐波抑制的一个重要趋势<sup>[1]</sup>。这种滤波器能动态抑制谐波、补偿无功, 能对变化的电网谐波及无功电流实现连续动态的跟踪补偿, 补偿特性不受电网阻抗的影响。有源滤波器的关键技术是实时检测负载电流中的谐波和无功电流分量, 以得到有源滤波器所需的参考补偿量。

谐波与无功电流检测的方法有很多, 有功电流分离法是近年来出现的一种单相电路无功和谐波电流检测新方法<sup>[3-5]</sup>。其基本原理是将单相电网电流进行分解, 用与电网电压同频同相的单位正余弦信号分别与电网电流相乘, 经过低通滤波器后得到电网电流中的瞬时基波有功电流和瞬时无功电流, 进而得到瞬时谐波电流。该方法算法简单, 硬件实现容易。

有功电流分离法中, 与电网电压同频同相的单位正余弦信号是用锁相环得到的。使用锁相环虽然可以得到电网电压的基频和初相角, 但也容易受到信号的影响<sup>[2]</sup>。在电气化铁道中, 电力机车是一个运行的、急剧变化的负荷, 势必引起牵引供电系统网压的波动, 当电网电压波动较严重时, 较大的频率偏移会导致锁相环处于失锁状态而无法准确地进行相位跟踪, 从而难以得到与电网电压同频同相的单位正余弦信号, 也就无法准确地进行谐波和无功电流的检测。

文献[6]提出了一种无锁相环的方法, 该方法分析了三相电路 d-q 变换过程中频率偏差对检测

结果不影响, 对单相电路不适用。本文在有功电流分离法的基础上, 提出了一种无锁相环的单相电路谐波和无功电流检测方法, 通过预先设定正余弦信号的频率和初相角, 从而不要锁相环就能准确检测出负载电流的谐波和无功分量。该方法实现了有功电流分离法的优点, 不受电压畸变的影响, 节省了锁相环电路, 算法简单, 容易实现。分析和仿真证明, 该方法可以实时、准确地检测谐波和无功电流。

## 1 无锁相环的单相电路谐波和无功电流检测的基本原理

不失一般性, 假设电网电压无畸变, 令  $u_s(t) = U_s \cos t$ , 周期性非正弦电网电流用傅里叶级数展开为:

$$\begin{aligned} i_s(t) &= I_m \cos(t + \varphi_1) + \sum_{n=3}^{\infty} I_{nm} \cos(n t + \varphi_n) = \\ &= I_m \cos \varphi_1 \cos t - I_m \sin \varphi_1 \sin t + \\ &= \sum_{n=3}^{\infty} I_{nm} \cos(n t + \varphi_n) = i_p(t) + i_q(t) + \\ &= i_h(t) = i_i(t) + i_h(t) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $i_i(t)$  为瞬时基波电流;  $i_p(t)$  为瞬时基波有功电流;  $i_q(t)$  为瞬时基波无功电流;  $i_h(t)$  为瞬时谐波电流。  $\varphi_1$  为基波电流  $i_i(t)$  的初相角;  $\varphi_n$  为各次谐波电流的相位角。

一般电网电流中都含有 3 次以上的谐波, 故上式中的  $n$  以 3 为下限。

式(1)中电网电流  $i_s$  可以测出,  $\cos t$  是与电网电压同相位的正弦量。如果能够计算出  $I_m$  和  $\varphi_1$ , 就可算出基波有功和无功电流, 从而得到谐波电流。

在电气化铁道中, 电压电流的基频都是 50 Hz,

经过有源滤波器补偿后也希望得到频率为 50 Hz 基频电流,并且检测出的基频电流实际上也是 50 Hz,因此,可以直接确定正余弦信号的角频率  $\omega = 2\pi f$ ,  $f = 50$  Hz,相位角任意,设为  $\theta$ ,则正余弦信号分别为  $\sin(\omega t + \theta)$ 、 $\cos(\omega t + \theta)$ 。将上式两边同乘以  $\cos(\omega t + \theta)$ ,则有:

$$i_s(t) \cos(\omega t + \theta) = I_m \cos(\omega t + \theta + \phi_1) \cos(\omega t + \theta) + \sum_{n=3} I_m \cos(n\omega t + \theta + \phi_n) \cos(\omega t + \theta) = \frac{I_m}{2} [\cos(\phi_1 - \theta) + \cos(2\omega t + \theta + \phi_1 + \theta)] + \sum_{n=3} \frac{I_m}{2} \{ \cos[(n+1)\omega t + \theta + \phi_n + \theta] + \cos[(n-1)\omega t + \theta + \phi_n - \theta] \} \quad (2)$$

其中直流分量为:

$$I_p = \frac{I_m}{2} \cos(\phi_1 - \theta) \quad (3)$$

采用截止频率低于 2 倍电流基波频率的低通滤波器对  $i_s(t) \cos(\omega t + \theta)$  进行滤波,可得  $I_p$ 。

同理,将式 (1) 两边同乘以  $\sin(\omega t + \theta)$ ,则有:

$$i_s(t) \sin(\omega t + \theta) = I_m \cos(\omega t + \theta + \phi_1) \sin(\omega t + \theta) + \sum_{n=3} I_m \cos(n\omega t + \theta + \phi_n) \sin(\omega t + \theta) = \frac{I_m}{2} [\sin(\phi_1 - \theta) + \sin(2\omega t + \theta + \phi_1 + \theta)] + \sum_{n=3} \frac{I_m}{2} \{ \sin[(n+1)\omega t + \theta + \phi_n + \theta] + \sin[(n-1)\omega t + \theta + \phi_n - \theta] \}$$

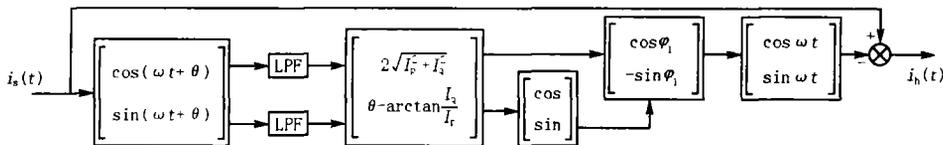


图 1 检测原理图

Fig 1 Principle of detection

由图 1,该检测方法节省了锁相环电路,幅值和初相角的计算可以通过 DSP 实现,因此使用乘法器、低通滤波器、加法器就可实现,从而简化了硬件电路。

当电网电压发生畸变时,综上,仍以正余弦信号  $\sin(\omega t + \theta)$ 、 $\cos(\omega t + \theta)$  为参考,可求电网基波电压的初相角  $\phi_1$  及基波电流的幅值  $I_m$  和初相角  $\phi_1$ 。特殊地,若设  $\theta = 0$  则:

$$\phi_1 = - \arctan \frac{U_q}{U_p} \quad (12)$$

$$U_{I_m} = 2 \sqrt{U_p^2 + U_q^2} \quad (13)$$

$$u_{I_p}(t) = U_{I_m} \cos \phi_1 \cos \omega t \quad (14)$$

$$u_{I_q}(t) = - U_{I_m} \sin \phi_1 \sin \omega t \quad (15)$$

$$\sum_{n=3} \frac{I_m}{2} \{ \sin[(n+1)\omega t + \theta + \phi_n] + \sin[(n-1)\omega t + \theta + \phi_n - \theta] \} \quad (4)$$

其中直流分量为:

$$I_q = \frac{I_m}{2} \sin(\phi_1 - \theta) \quad (5)$$

采用同样的低通滤波器对  $i_s(t) \sin(\omega t + \theta)$  滤波,可得  $I_q$ 。

由式 (3) 与式 (5) 可推得:

$$I_m = 2 \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (6)$$

$$\phi_1 = - \arctan \frac{I_q}{I_p} \quad (7)$$

特殊地,若假设  $\theta = 0$  则:

$$\phi_1 = - \arctan \frac{I_q}{I_p} \quad (8)$$

综上,只要任意给定一个相位角  $\theta$ ,以正余弦信号  $\sin(\omega t + \theta)$ 、 $\cos(\omega t + \theta)$  为参考,由式 (7)、式 (8) 就可计算出  $I_m$ 、 $\phi_1$ ,从而可得基波有功电流、基波无功电流及谐波电流:

$$i_{I_p}(t) = I_m \cos \phi_1 \cos \omega t \quad (9)$$

$$i_{I_q}(t) = - I_m \sin \phi_1 \sin \omega t \quad (10)$$

$$i_h(t) = i_s(t) - i_{I_p}(t) - i_{I_q}(t) \quad (11)$$

由式 (3) ~ (11) 构造无锁相环的单相电路谐波和无功电流检测原理图如图 1 所示。

$$u_s(t) = U_m \cos(\omega t + \phi_1) + \sum_{n=3} U_m \cos(n\omega t + \phi_n) \quad (16)$$

$$I_m = 2 \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (17)$$

$$\phi_1 = - \arctan \frac{I_q}{I_p} \quad (18)$$

由此可得电网基波有功电流、基波无功电流及谐波电流:

$$i_{I_p}(t) = I_m \cos(\phi_1 - \theta) \cos(\omega t + \phi_1) \quad (19)$$

$$i_{I_q}(t) = - I_m \sin(\phi_1 - \theta) \sin(\omega t + \phi_1) \quad (20)$$

$$i_h(t) = i_s(t) - i_{I_p}(t) - i_{I_q}(t) \quad (21)$$

## 2 仿真分析

### 2.1 电网电压无畸变的情况

本文基于 Matlab/Simulink 针对上述检测方法进行了仿真。仿真中设电网电压无畸变,负载为单

相感性整流负载。电网电压  $u_s$ 、电流波形  $i_s$  如图 2(a)所示,  $i_s$  为滞后电压  $1/6$  的方波电流。仿真结果见图 2(b)、2(c)、2(d)、2(e)。

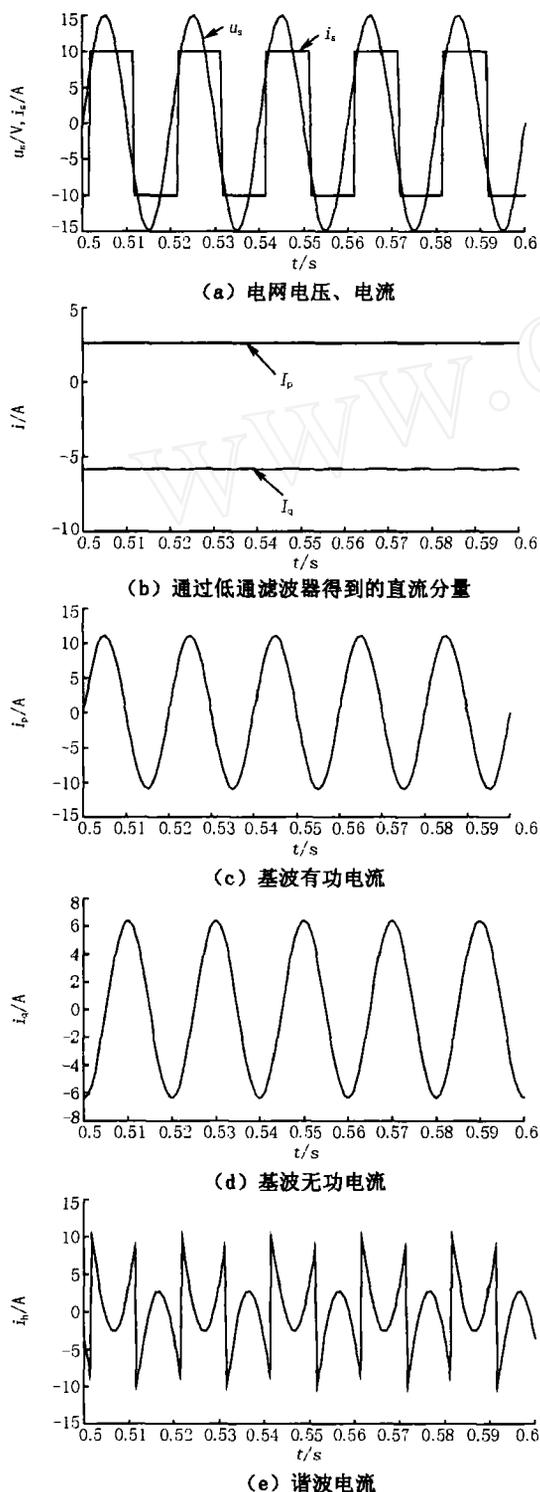


图 2 电网电压无畸变时的仿真结果

Fig 2 Simulation results under normal voltages

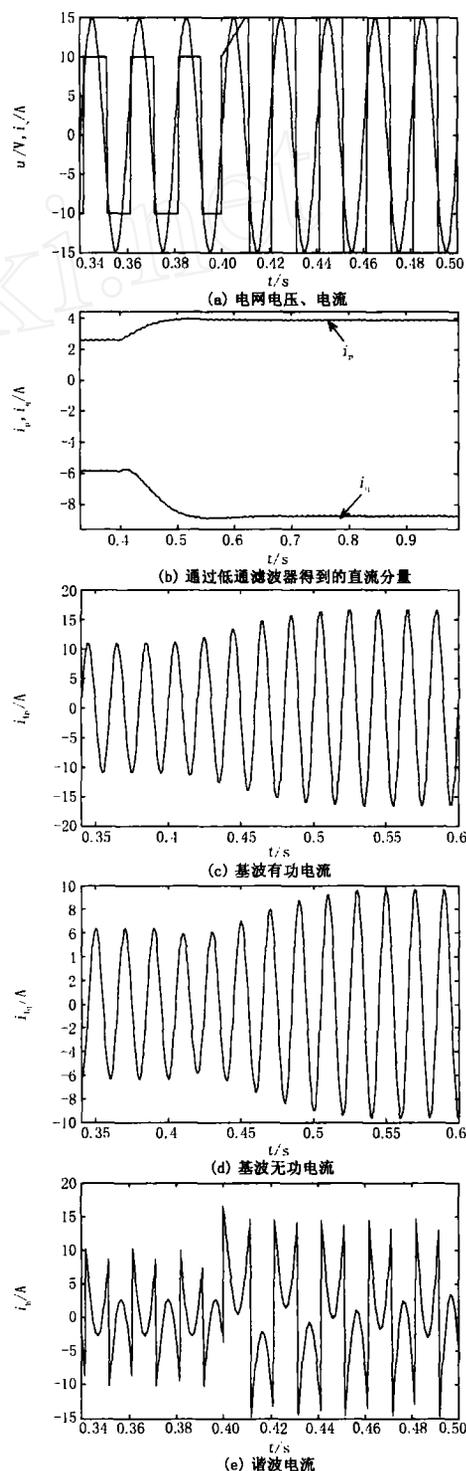


图 3 动态响应性能仿真

Fig 3 Simulation for performance of dynamic response

图 3是在电网电压没有畸变时对该检测方法的

动态响应性能的仿真结果。假定电网电流为  $180^\circ$  方波,与电网电压的相位差为  $30^\circ$ 。为便于观察,假设在  $0.40 \sim 0.41$  ms 之间,  $i_s$  的幅值由  $10$  mA 线性增加到  $15$  mA,  $u_s$ 、 $i_s$  的波形如图 3(a)所示。图 3(b)、3(c)、3(d)、3(e)分别为检测电路低通滤波器的输出、基波有功电流、基波无功电流及谐波电流的检测结果。由图可见,无论从检测电路低通滤波器的输出,还是从基波电流和谐波电流的检测结果来看,都是大约在  $0.4$  s 开始变化直到  $0.5$  s 结束并稳定。检测方法有  $0.1$  s 延时(这一延时是由低通滤波器引起的)。可见检测方法的跟踪性能比较快。

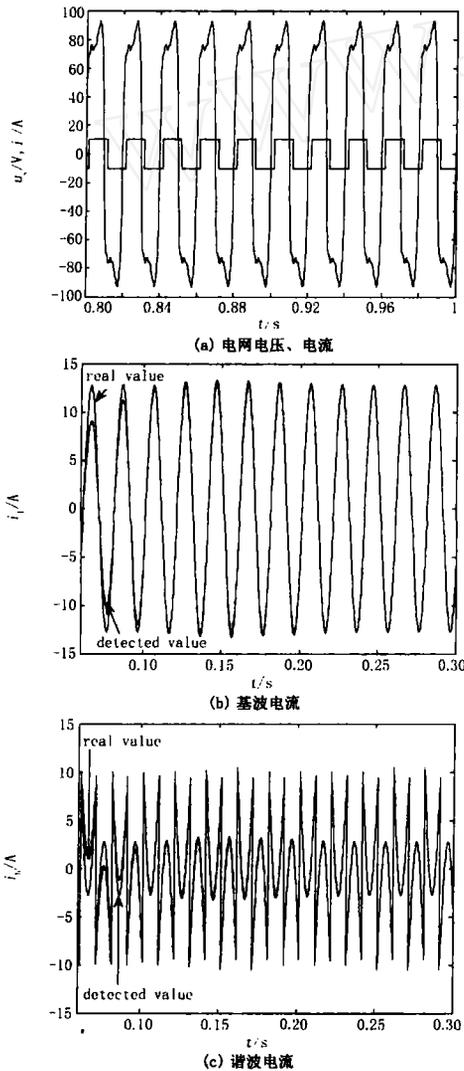


图 4 电网电压畸变无锁相环时的仿真结果  
Fig 4 Simulation results under abnormal voltages and having no phase-locked loop

## 2.2 电网电压有畸变的情况

仿真中设电网电压发生了畸变,负载仍为单相

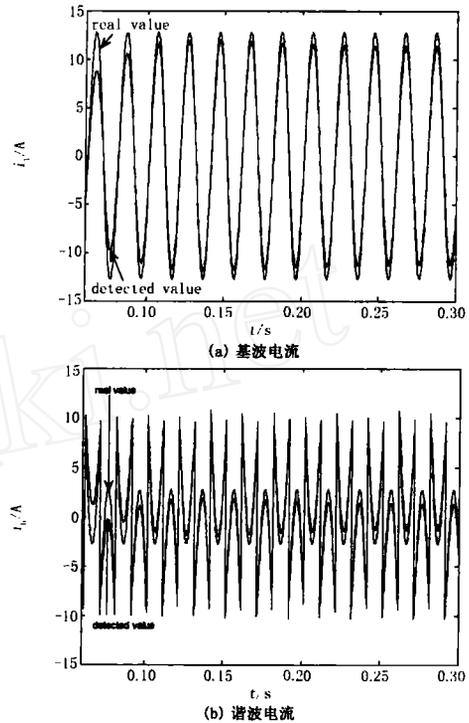


图 5 电网电压畸变有锁相环时的仿真结果

Fig 5 Simulation results under abnormal voltages and having phase-locked loop

感性整流负载。电网电压  $u_s$ 、电流波形  $i_s$  如图 4(a)所示。电网电压  $u_s$  含有 3、5、7、9、11 次谐波,  $i_s$  仍为滞后基波电压  $1/6$  的方波电流。采用该检测方法的仿真结果如图 4(b)、4(c)所示。

图 4(b)是对基波电流的检测结果。图中两条曲线分别是基波电流理论值曲线和检测值曲线。由图可见,大约  $0.1$  s 后两曲线重合,由此说明该方法能够实时、准确地检测电网基波电流。图 4(c)是对谐波电流的检测结果。

图 5 是电网电压发生畸变时含有锁相环电路的仿真结果。电网电压  $u_s$ 、电流波形  $i_s$  仍如图 4(a)所示。图 5(a)是基波电流的检测结果、5(b)是对谐波电流的检测结果。由图可见,在电网电压发生畸变时含有锁相环电路无法准确地检测谐波和无功电流。

## 3 结论

本文在有功电流分离法的基础上,构造了一种无锁相环的单相电路谐波检测方法,通过预设正弦信号的基频和初相角,不要锁相环就能准确地检测出谐波和无功电流。该检测方法中幅值和初相角的计算,可以通过 DSP 实现,从而简化了硬件电路。

通过分析和仿真证明,该方法节省了锁相环电路,算法简单,硬件电路容易实现。

#### 参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功补偿 [M]. 北京:机械工业出版社,1998. 209-238  
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Harmonic and Suppression and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 1998. 209-238
- [2] 张厥盛,郑继禹,万心平. 锁相技术 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1994. 1-18  
ZHANG Jue-sheng, ZHENG Ji-yu, WAN Xin-ping. Phase-locked Technology [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1994. 1-18
- [3] 任永峰,李含善,贺纲,等. 两种单相电路瞬时谐波及无功电流实时检测方法分析 [J]. 电力系统及其自动化学报,2003,15(1):95-98  
REN Yong-feng, LI Han-shan, HE Gang, et al. Analysis of Two Real-time Detecting Methods for Harmonic and Active Currents in Single-phase Circuit[J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15(1): 95-98
- [4] 蒋斌,颜钢锋,赵光宙. 单相电路瞬时谐波及无功电流实时检测新方法 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(21): 35-39  
JIANG Bin, YAN Gang-feng, ZHAO Guang-zhou. A New Real-time Detecting Method for Harmonic and Active Currents in Single-phase Circuit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(21): 35-39
- [5] 李天博,孙雨华,廖志凌. 一种单相电路无功电流实时检测新方法的研究 [J]. 电测与仪表,2003,(7):8-11.  
LI Tian-bo, SUN Yu-hua, LIAO Zhi-ling. Study of New Real-time Detecting Method for Active Currents in Single-phase Circuit[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2003, (7): 8-11.
- [6] 戴列峰,蒋平,田大强. 无锁相环 d-q谐波电流检测法的实现 [J]. 电网技术,2003,27(8):46-49.  
DAI Lie-feng, JIANG Ping, TIAN Da-qiang. Realization of d-q Detecting Method for Harmonic[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 46-49.

收稿日期: 2006-01-08; 修回日期: 2006-04-03

#### 作者简介:

丁菊霞(1977-),女,硕士研究生,研究方向为电力电子技术应用;E-mail: northdingding@163.com

张秀峰(1961-),男,副教授,研究方向为供电技术、继电保护和电力电子技术。

### Method for detecting harmonics and reactive currents in single-phase circuit without phase-locked loop

DING Ju-xia<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiu-feng<sup>1</sup>

(1. Emei Branch, Southwest Jiaotong University, Emeishan 614202, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Active current separate method is detected in recent years for detecting harmonics and reactive currents in single-phase circuit. In the electric railway, locomotive is a running and mutative single-phase load. When it brings the electric voltage to serious distortion, phase-locked loop in active current separate method will be abnormal and harmonics and reactive currents can't be detected accurately. Based on the reduction of active current separate method, a method without phase-locked loop for detection is presented. Analysis and simulation reveal that the proposed method is simple and easy to realize with accurate detection.

**Key words:** phase-locked loop; single-phase circuit; harmonics; reactive currents; real-time detection

(上接第 49 页 continued from page 49)

### Application analysis of IEC61850 protocol based on the ethernet technology

GAO Hui-sheng, XIANG Hong-yin, LIU Guang

(Department of Electronic and Communication Engineering, North China Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** This paper analyzes the application of SVG(Scalable Vector Graphics), which are supported by SAS(Substation Automation Systems) based on IEC 61850. SVG is applied extendedly in the namespace and XML(Extensible Markup Language) is used as a crucial tool to describe this picture style. It is also the software language to describe SCL model. It points out that SVG can get real time data from servers, which is validated on the .NET plat. To some extent, the expansion application helps to develop products founded on IEC 61850.

**Key words:** IEC61850; SVG; XML