

基于 DSP 平台的电压闪变测量及其误差校正

袁帅¹, 黄润长², 佟为明¹, 郭奕³

(1. 哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 西安供电局, 陕西 西安 710032;
3. 陕西电力职工培训中心, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对 IEC 推荐的电压闪变测量方法设计过程复杂、实现较困难的问题, 在采用 DSP 平台的闪变仪中实现了基于快速傅里叶变换的闪变测量方法, 该方法的应用可简化闪变值的计算过程。给出了硬件结构框图及关键步骤之一 FFT 算法的实现方法。对闪变测量方法的主要环节进行了误差分析并得到校正系数, 通过对校正系数的多项式拟合提高了测量精度。实验数据验证了该方法的正确性和有效性。

关键词: 电压闪变; 瞬时闪变视感度; 误差校正; DSP; 快速傅里叶变换 (FFT)

Voltage flicker measurement and its error correction based on DSP platform

YUAN Shuai¹, HUANG Run-chang², TONG Wei-ming¹, GUO Yi³

(1. Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Xi'an Power Supply Bureau, Xi'an 710003, China; 3. Shaanxi Electric Power Vocation Training Center, Xi'an 710054, China)

Abstract: According to the fact that design process is complex and realization is difficult in flicker measurement method recommended by IEC, the method of flicker measurement based on FFT is realized in DSP platform, and it can simplify the calculation process of flicker parameters. Structure diagram of hardware and realization process of FFT, one of the key steps in the method, are presented in this paper. Error of the main links in the method is analyzed and the correction factors are given. Through polynomial fit of the factors, measuring accuracy is improved. The experimental data shows that this method is correct and effective.

Key words: voltage flicker; instantaneous flicker sensation level; error correction; DSP; fast Fourier transform (FFT)

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)21-0047-05

0 引言

随着电力系统中波动性、冲击性负荷的增加, 电压波动的情况也越来越严重。电压波动会使电网中运行的电气设备受到严重影响, 如照明设备闪烁、控制设备误动作、电动机转速波动等。由于白炽灯的光功率与电源电压的平方成正比, 受电压波动的影响最大, 因此通常选择人眼对白炽灯照度波动的敏感反应, 即“闪变^[1]”, 作为衡量电压波动危害程度的评价指标^[2]。为了抑制和治理电压波动与闪变, 电网投入了一定的补偿设备。这些设备的研制和整定均需要准确详细的闪变参数, 以提供正确的治理决策, 因此对电压波动和闪变的实时监测, 即准确测量短时间闪变值 P_{st} 和长时间闪变值 P_{lt} 是治理电压波动和闪变的基础。

国家标准 GB 12326-2000 (参考国际电工委员会电磁兼容标准 IEC 61000-3-7 制定^[3]) 给出了闪变测量原理框图。文献[2,3]根据 IEC 推荐的闪变仪设计规范, 给出了数字式闪变仪各环节滤波器的传递函数和运算结构, 实现了数字式闪变仪的设计。文

献[6]针对 IEC 推荐的闪变测量方法在不同频率下检测到的电压波动值存在测量误差的情况, 通过多项式拟合求出了误差的表达式并对其进行校正。文献[7]提出了基于快速傅里叶变换 (FFT) 计算短时间闪变值的方法, 该方法省略了 IEC 方法中较复杂的滤波器设计工作, 从而简化了闪变值的计算过程。文献[8]分析了文献[7]的方法在不同频率下的计算误差并对其进行校正。

目前, 基于 DSP、ARM 等嵌入式系统的闪变仪较多采用的是 IEC 给出的闪变测量方法^[9-12], 该方法需设计多个滤波器并进行多次滤波运算, 实现过程较复杂。本文在采用 DSP 芯片的闪变仪中实现了基于快速傅里叶变换的闪变测量方法, 分析了在 DSP 平台上该方法主要环节的误差并对计算结果进行了误差校正。

1 闪变测量方法

图 1 为 IEC 推荐的闪变仪设计原理框图。在图 1 框图中, 闪变测量总体上分为三部分: 第一部分为电压输入适配调整, 由图中框 1 组成; 第二部分

模拟视觉系统模型，即灯-脑-眼反映链的频率响应特性，由图中框 2、框 3 和框 4 组成。其中框 2 对电压波动分量进行解调，获得与电压变动成线性关系的电压，框 3 的带通加权滤波器反映了人对 230 V、60 W 钨丝灯在不同频率的电压波动下照度变化的敏感程度，通频带为 0.05~35 Hz；框 4 包含一个平方器和时间常数为 300 ms 的低通滤波器，用来模拟灯-脑-眼环节对灯光照度变化的暂态非线性响应和记忆效应。框 4 的输出 $S(t)$ 反映了人的视觉对电压波动的瞬时闪变感觉水平；第三部分为测量到的瞬时闪变感度的统计分析，输出为短时间闪变值 P_{st} 和长时间闪变值 P_{lt} ，由框 5 组成。

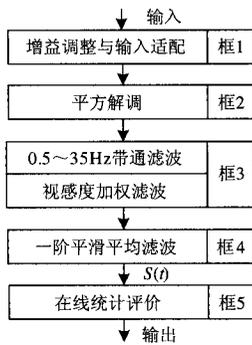


图 1 IEC 推荐的闪变测量原理框图

Fig. 1 Diagram of flicker measurement principle recommended by IEC

由前面的叙述可知，IEC 给出的闪变测量方法计算过程较为复杂，在数字式装置中实现具有一定的难度。本文设计的闪变仪采用了文献[7]提出的基于 FFT 的离散化计算方法，该方法是一种简单实用的简化方法，其计算步骤如下：

(1) 采用均方根计算公式对电压信号采样值 $u(n)$ 每一个周波求出一个电压均方根值，得到一段时间内的电压均方根值序列 $U(N)$ ，形成离散的电压均方根值曲线，设 N 为一个周波内的采样点数

$$U(N) = \sqrt{\sum_{n=1}^N u(n)^2 / N} \quad (1)$$

(2) 对数列 $U(N)$ 进行快速傅里叶变换 (FFT)，求出其离散的频谱序列 $U(K)$ 。电压波动定义为

$$d = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \times 100\% \quad (2)$$

式中： U_{\max} 、 U_{\min} 分别为电压均方根值的两个相邻极值，它们的差即峰峰值， U_N 为额定电压。频率 f_i 的频谱幅值的 2 倍对应着该频率下正弦电压均方根

值曲线的电压波动值，将该值除以分解出的直流分量得到该频率下的电压波动 $d(i)$ ， $d(i)$ 与在频率 f_i 上产生 1 个单位瞬时闪变视感度所需的电压波动 $d(i)$ 相除后再取平方值，即为该频率下的瞬时闪变视感度

$$S_i(t) = [d(i) / d_i]^2 \quad (3)$$

(3) 由于一段波形均方根值的平方等于组成该波形的各频率分量均方根值的平方和，电压均方根值序列 U_N 对应的 $S(t)$ 值就等于其频谱上各频率对应的 $S_i(t)$ 值之和

$$S(t) = \sum_{i=1}^N S_i(t)^2 \quad (4)$$

上述三个步骤构成了瞬时闪变视感度的离散化计算过程，对于一段时间内的电压波动，可通过累计概率函数 (CPF) 曲线或排序法统计计算其引起的闪变值，对于稳定的周期性电压波动，可通过式 5 计算其引起的短时间闪变值 P_{st}

$$P_{st} = 0.714 \sqrt{S(t)} \quad (5)$$

长时间闪变值 P_{lt} 可由一段时间内的 N 个 P_{st} 的立方和求根得到

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{st,i}^3} \quad (6)$$

2 闪变仪硬件结构及算法实现

2.1 硬件结构

闪变仪的硬件结构框图如图 2 所示，主要由以下 6 个功能模块组成：CPU 单元、存储器单元、

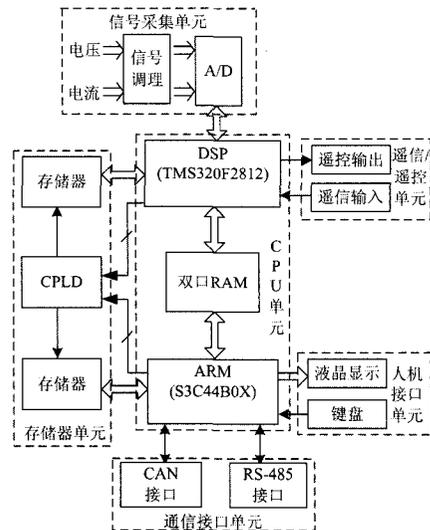


图 2 硬件结构框图

Fig. 2 Block diagram of hardware system

信号采集单元、通信接口单元、人机接口单元和遥控/遥控单元。装置采用 DSP+ARM+双口 RAM 结构,其中 DSP TMS320F2812 作为主 CPU 负责信号采集、闪变信号计算与分析、事件记录、遥控/遥信; ARM S3C44B0X 作为辅助 CPU 负责液晶显示、键盘操作、网络通信(CAN 和 RS-485);两个 CPU 之间通过双口 RAM 进行数据交换。

2.2 FFT算法在DSP平台的实现

由前述可知,FFT 算法是计算闪变值的关键步骤之一,本文在 TMS320F2812 DSP 芯片上实现了 1024 点实数 FFT 算法。FFT 核心算法部分采用汇编语言实现,接口程序部分则用 C 语言实现,这样不仅使代码执行效率高、实时性好,而且结构更加合理。FFT 算法流程图如图 3 所示,其计算过程如下:获得一个采样序列后,首先归一化为 DSP 的定点数据格式(即 Q 格式);为了加快计算速度,将 N 点实数组合成 $N/2$ 点复数;将数据按倒位序重新排列;然后进行 FFT 运算,FFT 运算完后将计算结果重新排序,即得到傅里叶变换后的序列。

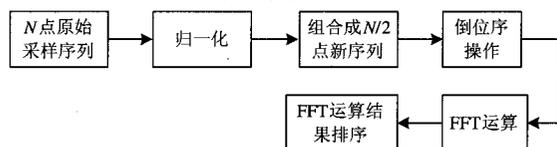


图 3 FFT 算法流程图

Fig. 3 FFT algorithm flow chart

基于 TMS320F2812 DSP 芯片的 FFT 算法的设计主要有以下几个关键问题:

(1) 归一化

归一化主要是为了解决 FFT 计算中的数据溢出问题,同时也为了提高计算速度和保证计算结果具有较高的精度,将输入数据归一化为 Q30 格式表示^[13]。

(2) 倒位序

FFT 算法通常将原始数据倒位序存储,最后按正常顺序输出结果。具体方法是将数据在数组中的序号反过来排序得到新的序号再重新存储,例如数据在数组中的序号 n 用二进制数表示为 $b_6b_5b_4b_3b_2b_1b_0$,倒位序后其序号变为 $b_0b_1b_2b_3b_4b_5b_6$ 。

(3) 旋转因子的选取

若将采样序列的点数表示成 $N=2^L$,则 N 点 FFT 共有 L 次运算。旋转因子通过查询 FFT_{if} 表获得,此表在程序运行之前预先写入到 DSP 的单周期访问 RAM 存储器中。FFT_{if} 表中共有 768 字的数据,采用定点数据格式 Q30 格式存储。分别为 \sin 在 $-\pi/2\sim\pi/2$ 区间的值,或是看成 \cos 在 $0\sim\pi$ 区间的值,每个区间进行 256 等分。当 N 为 1024 时,通过设

置指针移动的步长来查询表 FFT_{if} 的正弦和余弦值即可获得每次蝶形运算的旋转因子。

(4) FFT 计算时间分析

经实验,执行一次 1024 点 FFT 约需约 73422 个时钟周期,按 2812 的工作频率 120 MHz 计算,共计 0.6119 ms。完全可以满足闪变值实时计算的要求。

3 误差分析及校正

3.1 FFT 计算误差分析

在 Matlab 里生成含有 3 次谐波的工频信号,幅值进行了归一化,如式(7)所示。

$$u = \sin(2\pi \cdot 50 \cdot t + \varphi) + 0.5 \sin(2\pi \cdot 150 \cdot t + \varphi) \quad (7)$$

用 6400 Hz 的采样频率对信号进行采样并取数据窗为 1024 点,将数据载入到 DSP 板后用 FFT 算法计算幅值,并与 Matlab 中的 FFT 计算结果进行比较。计算结果如表 1 所示,DSP 上的 FFT 算法误差最大为 0.004%,不影响闪变计算的精度。

表 1 用 FFT 算法计算幅值的比较

	真实值	Matlab 计算值	DSP 计算值
基波	1	1.0000	1.00001
3 次谐波	0.5	0.5000	0.50002

3.2 瞬时闪变视感度计算误差分析与校正

在 Matlab 中根据 IEC 给出的 $S(t)=1$ 时不同频率的调制波电压波动数据,构建电压波动信号,然后将数据载入到 DSP 中,根据本文的算法计算瞬时闪变视感度 $S(t)$,对 $S(t)$ 进行校验。

表 2 $S(t)$ 相对误差和修正系数

f / Hz	$d / (\%)$	$S(t)$	$e / (\%)$	k	$e_k / (\%)$
0.5	2.304	0.994	0.6	1.006	0.0416
1.0	1.432	0.992	0.8	1.0081	0.0328
1.5	1.080	0.994	0.6	1.006	-0.0260
2.0	0.882	0.995	0.5	1.005	0.0735
2.5	0.754	0.990	1	1.0101	0.0254
3.0	0.654	0.989	1.1	1.0111	-0.0913
3.5	0.658	0.988	1.2	1.0121	0.1111
4.0	0.5	0.982	1.8	1.0183	-0.0397
4.5	0.445	0.978	2.2	1.0225	-0.0159
5.0	0.398	0.976	2.4	1.0246	0.0103
5.5	0.360	0.969	3.1	1.032	-0.0950
6.0	0.328	0.962	3.8	1.0395	0.2299
6.5	0.3	0.954	4.6	1.0482	0.0865
7.0	0.28	0.947	5.3	1.056	-0.2068

续表 2

f / Hz	$dl (\%)$	$S(t)$	$e_l (\%)$	k	$e_k l (\%)$
7.5	0.266	0.945	5.5	1.0593	-0.2468
8.0	0.256	0.941	5.9	1.0582	0.0544
8.8	0.250	0.938	6.2	1.0627	-0.0303
9.5	0.254	0.935	6.5	1.0661	0.2585
10.0	0.262	0.930	7	1.0753	0.0020
10.5	0.270	0.926	7.4	1.0799	0.2997
11.0	0.282	0.913	8.7	1.0953	-0.1512
11.5	0.296	0.901	9.9	1.1099	-0.3686
12.0	0.312	0.894	10.6	1.1186	0.0144
13.0	0.348	0.870	13	1.1494	-0.1265
14.0	0.388	0.856	14.4	1.1682	0.3587
15.0	0.433	0.844	15.6	1.1848	-0.1396
16.0	0.48	0.823	17.7	1.2151	-0.0724
17.0	0.53	0.815	18.5	1.227	0.1732
18.0	0.584	0.797	20.3	1.2547	-0.1081
19.0	0.64	0.781	21.9	1.2804	0.1750
20.0	0.7	0.753	24.7	1.328	-0.4860
21.0	0.76	0.738	26.2	1.355	0.3005
22.0	0.824	0.715	28.5	1.3986	0.3259
23.0	0.89	0.684	31.6	1.462	-0.5183
24.0	0.962	0.671	32.9	1.4903	0.2595
25.0	1.042	0.650	35	1.5385	-0.0494

表 2 中第 3 列 $S(t)$ 项为 DSP 计算出的瞬时闪变视感度，第 4 列 e 项为其相对真实值的误差。可以看出，随着调制波频率的增大，闪变值计算的误差也变大，这是由于闪变值计算方法需要先求出电压均方根值，电压均方根值随调制波频率的增大而衰减从而产生误差^[14]。因此需要根据频率对 $S(t)$ 进行校正，表 2 中第 5 列 k 项为根据 $S(t)=1$ 计算出的校正系数，根据校正系数 k 的变化规律，将其按频率分成 0.5~5 Hz, 5~15 Hz, 15~25 Hz 三段，分段对其进行多项式拟合，拟合多项式如式 8 所示。

$$k(f) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i f^i \quad (8)$$

式中： f 为频率， a_i 为多项式的系数，取值分别为如表 3 所示，多项式的阶数由实验选取，0.5~5 Hz 段取 $n=3$ ，5~15 Hz 段取 $n=4$ ，15~25 Hz 段取 $n=3$ 。表 2 中第 6 列 e_k 项为用拟合后的系数计算出的 $S(t)$ 的误差，拟合后的误差均小于 1%。

表 3 多项式拟合系数

Tab. 3 The coefficients of fitness polynomial

频段/Hz	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
0.5~5	0.8808	0.0969	-0.027	0.0023	
5~15	1.8155	-0.3729	0.0593	-0.0041	0.0001
15~25	-0.5376	0.2242	-0.0116	0.0002	

通过多项式拟合可求出对应任意频率分量 ($f < 25 \text{ Hz}$) 的 $S(t)$ 的校正系数，在此基础上可利用公式 (5) 和 (6) 求出短时间闪变值 P_{st} 和长时间闪变值 P_{lt} 。

4 实验验证

根据 $S(t)=1$ 的电压波动值生成数据，将数据载入到 DSP 中计算 P_{st} ，计算结果如表 4 所示。表 4 中第 5 列 e 项为 P_{st} 值的计算误差，在 4 种不同调制频率情况下的计算误差均小于 1%，验证了该方法的正确性和有效性。

表 4 短时间闪变值 P_{st} 计算结果

Tab.4 Calculation results of short-term flicker severity

f / Hz	$dl (\%)$	$S(t)$	value P_{st}	
			P_{st}	$e_l (\%)$
4.5	0.445	0.9974	0.7131	0.26
8.8	0.250	0.9960	0.7126	0.4
12.0	0.312	1.0014	0.7145	0.14
19.0	0.64	1.0027	0.715	0.27

使用本文所设计的闪变测量仪对某地区 0.38 kV 配电网 2 h 内的电压数据进行电压闪变检测， P_{st} 的测量周期为 10 min。测试结果表明， P_{st} 最小值为 0.0884，最大值为 0.4675，平均值为 0.1381，低于 1.0 的国标限值。与该地区的实际情况对比，由于该监测点无工业负荷干扰，故闪变水平值较小，因此闪变仪检测结果符合实际情况。

5 结论

本文在采用 DSP 平台的数字式闪变仪中实现了基于 FFT 的闪变测量方法，该算法的计算过程简单，在数字式装置中较易实现。通过对瞬时闪变视感度 $S(t)$ 的校正及对校正系数的多项式拟合，提高了 $S(t)$ 的测量精度，在此基础上能准确地计算出短时间闪变值 P_{st} 和长时间闪变值 P_{lt} 。对于采用嵌入式系统设计的数字式闪变仪具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 杨洪耕, 肖先勇, 刘俊勇. 电能质量问题的研究与技术进展(四)——电压波动与闪变的测量分析[J]. 电

- 力自动化设备, 2004, 24(1): 1-4.
YANG Hong-geng, XIAO Xian-yong, LIU Jun-yong. Issues and Technology Assessment on Power Quality Part 4: Measurement and Analysis of Voltage Fluctuation and Flicker[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(1): 1-4.
- [3] IEC 61000-3-7, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3: Limits – Section 7: Limits Assessment of Emission Limits for Fluctuations Loads in MV and HV Power Systems[S].
- [4] 马玉龙, 刘连光, 张建华, 等. IEC 闪变测量原理的数字化实现方法[J]. 中国电机工程学报, 2001,21(11): 92-95.
MA Yu-long, LIU Lian-guang, ZHANG Jian-hua, et al. Research of Digital Flickermeter Based on IEC Standard[J]. Proceedings of the CSEE, 2001,21(11): 92-95.
- [5] 刘亚洲, 李威, 纪延超, 等. IEC 闪变检测方法的数字化实现[J]. 继电器, 2000, 28(3): 18-21.
LIU Ya-zhou, LI Wei, JI Yan-chao, et al. The Digital Realization of IEC's Flickermeter[J]. Relay, 2000, 28(3): 18-21.
- [6] 贾秀芳, 赵成勇, 胥国毅, 等. IEC 闪变仪误差分析及改进设计[J]. 电工技术学报, 2006, 21(11): 121-126.
JIA Xiu-fang, ZHAO Cheng-yong, XU Guo-yi, et al. Error Analyzing of IEC Flickermeter and Its Improving Design[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(11): 121-126.
- [7] 赵刚, 施围, 林海雪. 闪变值计算方法的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 15-18.
ZHAO Gang, SHI Wei, LIN Hai-xue. A Study on Calculation of Short Term Flicker Severity[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 15-18.
- [8] 赵海翔, 陈默子, 戴慧珠. 闪变值离散化计算的误差分析及其应用[J]. 电网技术, 2004,28(13): 84-87.
ZHAO Hai-xiang, CHEN Mo-zi, DAI Hui-zhu. Error Analysis of Discrete Calculation Method of Flicker Severity and Its Application[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 15-18.
- [9] 袁世英, 曹晖. 基于 DSP 的电压闪变仪的开发[J]. 继电器, 2005,33(4): 57-70.
YUAN Shi-ying, CAO Hui. Development of Voltage Flickermeter Based on DSP[J]. Relay, 2005,33(4): 57-70.
- [10] Gherasim C, Groes T, Van den Keybus J. Development of a Flickermeter for Grid-connected Wind Turbines Using a DSP-based Prototyping System[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2006, 55(2): 550-556.
- [11] 贺建闽, 黄治清, 李群湛. 闪变仪研制及其在电气化铁道的应用[J]. 西南交通大学学报, 2004,39(2): 217-221.
HE Jian-min, HUANG Zhi-qing, LI Qun-zhan. Development of Flickermeter and aApplication in Electrified Railways[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004,39(2): 217-221.
- [12] Huoy S L, Jamuar S S, Mohd R, et al. Digital Signal Processing Based Waveform Generator for Flickermeter Calibration Test System[A]. In: 4th student Conference on Research and Development (SCOReD 2006)[C]. Malaysia:2006.
- [13] Texas Instruments Inc. FFT Library Module User's Guide[EB/OL]. [2002-3].
<http://focus.ti.com.cn/cn/docs/toolsw/folders/print/sprc081.html>.
- [14] 雷林绪. 对电压波动闪变仪校验的一点看法[J]. 电网技术, 1999, 23(3): 41-43.
LEI Lin-xu. An Opinion on Calibration of Voltage Fluctuation and Flicker Meter[J]. Power System Technology, 1999, 23(3): 41-43.

收稿日期: 2008-08-01; 修回日期: 2008-08-22

作者简介:

袁帅(1980-), 男, 博士研究生, 研究方向为电能质量监控技术; E-mail:y_shuai@126.com

黄润长(1965-), 男, 高级工程师, 从事电气工程专业的工作;

佟为明(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电能质量监控技术、现场总线。

许继电气公司参加四川省电力公司数字化变电站技术交流会

10月14日—16日, 许继电气公司应邀参加了四川省电力公司召开的数字化变电站技术交流会。参加这次会议的有四川省电力公司调度中心、电力科学研究院、电力勘测设计院、成都市电力公司、绵阳市电力公司。

这次技术交流会的主要内容是数字化变电站工程实现方案及技术方面的探讨与交流。会上, 许继电气相关技术人员主要就数字化变电站智能化一次设备、网络化二次设备及 IEC61850 的实现方案和相关技术同用户进行了深入交流, 使用户对许继先进的数字化变电站实现方案产生了浓厚的兴趣。

对于这次技术交流会, 电网公司和技术中心召开专题会议, 成立了以许继电气副总经理兼电网公司总经理张学深为组长, 许继电气副总经理张新昌、许继北京电力光学技术有限公司总经理郭志忠为副组长, 技术中心和电网公司、许继北京电力光学技术有限公司相关技术骨干为成员的项目组, 为四川省电力公司绵阳东 220kV 数字化变电站项目进行商务、技术等方面提供全方位跟踪和大力支持。在技术中心、电网公司、许继北京电力光学技术公司的协力合作下, 圆满完成了技术交流会既定的任务, 为下一步的项目运作奠定了良好基础。