

电子式互感器合并单元的快速数据处理

王勇¹, 曹保定², 姜涛²

- (1. 东北电力大学 信息工程学院, 吉林省 吉林市 132012;
2. 北京国电四维电力技术有限公司, 北京市 密云县 101500)

Fast Data Processing for Merging Unit of Electronic Transformer

WANG Yong¹, CAO Bao-ding², JIANG Tao²

- (1. School of Information Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, Jilin Province, China;
2. Beijing Sowell Electric Power Technology Co., Ltd., Miyun County, Beijing 101500, China)

ABSTRACT: Considering the special technical requirements to meterage and protection functions of digital substation, the key problems in the application of electronic transformers are analysed. On this basis, the data processing function and its implementation of merging units in digital substation are expounded. In this paper, a feasible approach to integral operation of electronic current transformer by use of Rogowski coil is proposed; and to deal with integral initial value and zero drift, a prediction method is given and the integral link is replaced by one order inertial link to implement successive approximation, for this purpose a contracted calculation approach is put forward. Simulation results show that comparing with traditional discrete Fourier transform (DFT) algorithm with data window added the proposed calculation approach is feasible and can speed up the processing of current signal under short-circuit fault, besides, the proposed algorithm is suitable to the processing of voltage signal as well.

KEY WORDS: digital substation; electronic transformer; merging unit; phase synchronization; integration initial value

摘要: 结合数字化变电站对计量、保护等功能的特定技术要求, 分析了电子式互感器应用中的关键问题, 在此基础上阐述了数字化变电站中合并单元的数据处理功能的实现方法。文章讨论了采用 Rogowski 线圈的电子式电流互感器积分运算的可行方法, 针对积分初值及零点漂移问题, 提出预估法并采用一阶惯性环节来取代积分环节进行逐步逼近, 给出了电流有效值和相位的简便计算方法。仿真分析表明, 该算法与传统加数据窗口的离散傅里叶计算方法相比, 可有效减少短路故障条件下电流信号的处理时间, 且是可行的。此计算方法同样适用于电压信号的处理过程。

关键词: 数字化变电站; 电子式互感器; 合并单元; 相位统合; 积分初值

0 引言

新型电子式互感器的发展直接促进了数字化变电站一体化监控系统的产生, 是当前电力行业中正在大力推进的一项实用监控技术^[1-3]。基于这种现状, 无论是数字化保护还是电子式互感器的设计研制, 已不再是彼此孤立的状态, 需要用一体化的思想来考虑它们的设计问题。这也必然为变电站的保护、计量、监控等原理设计带来新的思路^[4-5]。

已公布的国家标准指出电子式互感器的标准输出装置为合并单元, 并对其基本功能及通信接口作了界定。从整个数字化变电站系统^[6]考虑, 合并单元不仅要实现原始采集数据的封装及转发, 还应完成一些关键数据(如保护用有效值、相位值等)的计算, 这样可以大大简化后续设计并提高系统的反应速度以及稳定性。

本文主要围绕电子式互感器设计中产生的相位差及合并单元中有效值、相位值快速计算等问题, 对合并单元的数据处理功能进行深入分析, 并给出简便有效的计算方法。

1 电子式互感器设计中的关键问题

本文仅讨论有源电子式互感器^[7-8]所涉及到的问题。作为设计对象, 其在实际应用中有如下技术特点:

1) 电气量监测以及继电保护所需的电气量信号所要求的是电压、电流量的宏观表示, 而不是瞬时值。电气量计量关心的是正常稳态运行条件下的有效数值, 其范围包括基波及所有可能存在的谐波。继电保护装置所需的电气量着重于对故障瞬变

过程的真实与快速的反映,主要关注的是基波的有效值和相位变化(特殊型保护除外,比如变压器差动保护),其精度要求不必过高,按继电保护规程要求,达到5%以下即可。

2) 电子式互感器把线性度作为一项重要指标,在电流测量中多采用空芯线圈(亦称 Rogowski 线圈)做传感器,它所产生的电势 e_R 与一次电流 i 的导数成正比,即 $e_R = k(di/dt)$, k 为比例系数。所以要得到电流的测量值,必须对 e_R 信号进行积分运算^[9-11]。在电压测量中多采用电容电阻串联分压器,其输出的电压信号与一次电压的导数成正比,利用与电流传感器类似的信号处理方法可求得被测电压^[12-13]。积分运算的解不是唯一的,取决于初始值的选取。因此纯粹的积分运算(无论是数值积分还是采用模拟电路的积分)都存在零点漂移现象,电子式互感器必须克服这种不利因素才能付诸实用。

3) 与传统电磁式互感器不同的是,电子式互感器多了一些中间变换和数据传送环节,因而会造成二次系统获取的信号在时间上滞后于一次量,而且各种单元的滞后时间可能还存在不可忽略的差别,进而带来各单元间的相位差。同时由于设计的原因电子式电流互感器的保护通道及电子式电压互感器可能会带来额定的相移。相位统合就是设法消除这些环节带来的相位差,不仅要消除一个线路单元三相电流、电压间的相位差,还要消除整个变电站各线路单元之间的相位差。进行相位统合的方法不止1种,这与电子式互感器的硬件和软件都有关,是一个系统性问题。

4) 传感器和信号变换元件工作在一个存在各种类型电磁干扰的环境下,因此必须考虑连续和离散信号转换间的抗混叠问题^[14]。一旦出现混叠现象,测量精度就无从谈起,甚至接收端所得的交流电波形会呈现不能容忍的畸变。设计时必须保证不会发生混叠现象。

2 合并单元的数据处理功能设计

2.1 积分初值及零点漂移分析

IEC 60044-8^[15]标准提出,合并单元用来组合一个线路单元互感器的三相电流和电压信号,统合它们的相位关系并给出有效值的相量形式,计算出本单元的有功功率、无功功率、电能积算量。

如前所述,电子式互感器传感器所测的是该电气量的微分信号,需要进行积分处理后才能应用^[16-19]。要得到确定的积分结果,必须给出准确初

值,此外还要解决积分环节的零点漂移问题。

关于积分初值,本文采取正弦函数的预估法予以估计。如果原信号是一个正弦波信号,其积分将是一个余弦函数。计算原信号在2个采样点间的斜率,即 $\Delta x/\Delta t$,作为积分初值的估计值,其中 $\Delta x = x_t - x_{t-1}$, x_t 、 x_{t-1} 分别是 t 和 $t-1$ 时刻的瞬时测量值,间隔时间是 Δt 。需要按照积分的原理以及 x_t 、 x_{t-1} 和 Δx 的符号来判断此估计初值的符号。

这一初值的估计值显然不十分准确,只能在以后的递推中逐步逼近。可行的逼近方法是采用一阶惯性环节来取代积分环节,完成积分运算。然而这种取代对于频率确定的周期函数来说,会产生一定的相位偏移,即正弦波函数积分后的相移不再是滞后 90° ,而是小于 90° 。图1是一阶惯性环节的对数幅频和相频曲线。

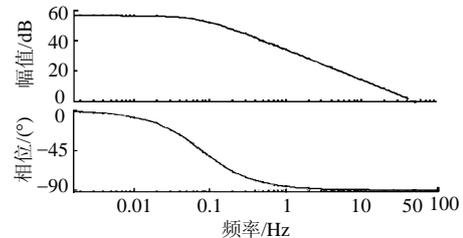


图1 一阶惯性环节的频率响应特性

Fig. 1 Frequency response of first order inertial link

当频率值有限时,相移小于 90° 。由于 A/D 转换和数字化传送,在地面接收到的传感器信号相对原信号是滞后的(滞后时间预计在 $5\sim 10\mu s$),此处可以利用一阶惯性的积分来弥补这种传送的滞后,使积分后的信号与一次侧原信号相位一致。经过仿真验证,这种方法不但有很好的逼近功能,且能有效避免零点漂移问题。这在数学上也可得到解释^[20]。

反映简单电流积分作用的微分方程为

$$di/dt = f(t) \quad (1)$$

式中: i 为一次侧电流信号; $f(t)$ 为 Rogowski 线圈的输出电流信号,可以写成 $I_m \sin(\omega t + \varphi)$, I_m 为信号波形的幅值。式(1)的解不存在不动点集,因而稍有扰动即可产生漂移,并且无自恢复能力。反映一阶惯性特性的微分方程为

$$T \frac{di}{dt} + i = f(t) \quad (2)$$

式中 T 为一阶惯性环节的时间常数。式(2)的解存在不动点集,受扰后有自恢复能力,恢复到它的不动点集。这一过程可以通过图2所示的模拟积分器实现,也可通过数字运算实现,这取决于是对模拟信号积分还是对数字信号积分。

图 2 所示的模拟积分电路按 $V_o = V_i \exp(-j\pi/2)$ 设计。在测试中, 当 C 取 $1 \mu\text{F}$ 、 R_5 取 $4.3 \text{ M}\Omega$ 时, 电路已能稳定无漂移地工作, 积分后的角误差在 $3'$ 以内。当断开 R_5 的连接线(即令 $R_5 = \infty \Omega$)时, 此电路输出始终漂移不定。由图 1 的对数频率曲线可见, 交流电频率的微小变化对相位的影响较小。关于对幅值的影响, 如果频率迅速可测, 可以通过运算来补偿。由于电力系统频率总是在小范围内波动, 上述运算中一阶惯性环节的时间常数较大, 按 50 Hz 时补偿 $5 \sim 10 \mu\text{s}$ 的时间滞后来计算, 约为 2 s 。这种运算方法能给出较高的平均值精度。

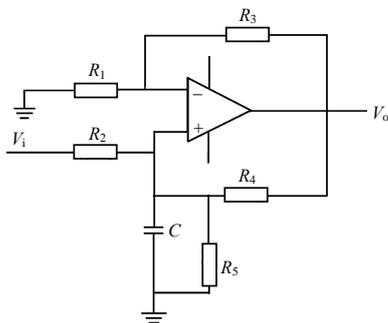


图 2 模拟积分器原理

Fig. 2 Principle of analog integrator

2.2 算法仿真及误差计算

以上用一阶惯性环节取代积分功能时, 在数值计算中采用前向差分法, 导出如下递推公式

$$y(n) = \alpha y(n-1) + k(1-\alpha)x(n) \quad (3)$$

式中: $\alpha = T/(T + \tau)$, $\tau = \Delta t$, Δt 是采样间隔时间, T 为时间常数; k 为一阶惯性环节的放大倍数, 其传递函数为 $k/(1 + Ts)$, 为计算方便, k 值按积分前后正弦或余弦波形的幅值相等来确定。

图 3 给出了这种计算方法中初始值设为零以及按上述方法估计的初始值进行仿真的波形。纵坐标 i 表征处理过程中的电气量, 可以是电流或电压, 幅

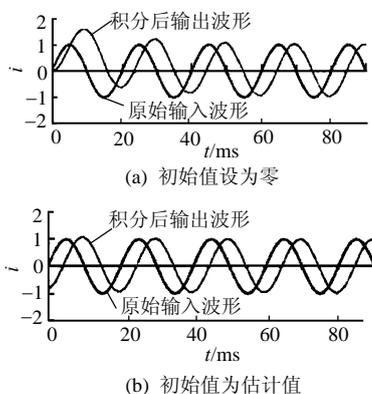


图 3 取不同初始值的波形仿真结果

Fig. 3 The result of waveform simulation with different initial value

值大小及单位可按比例选取。显然, 它们都有渐进的性质。而按上述估计方法进行仿真, 逼近的速度快, 这对继电保护的应用很重要。

由以上分析可以发现, 采用这种积分方法, 基波有效值和相位的计算问题也随之解决了。从测得的数值 $di/dt = I'_m \sin(\omega t + \varphi)$ 中计算与它相对应的积分值 $i = -I_m \cos(\omega t + \varphi)$ (由积分运算求得, 且取 $I_m = I'_m$, I_m 、 I'_m 分别为上述信号的幅值), 对于 50 Hz 的基波, 按下式求取模值

$$I_m = \sqrt{I_m^2 \sin^2(\omega t + \varphi) + I_m^2 \cos^2(\omega t + \varphi)} \quad (4)$$

按 $I = I_m / \sqrt{2}$ 即可得到基波的有效值。而 $\theta = \arccos(i_t / I_m)$ 即 i_t 在 t 时刻的相位, i_t 为 t 时刻的瞬时值。

经过数字计算分析验证, 对于标准的正弦波来说, 如果采样间隔时间 Δt 取 $10 \mu\text{s}$, 则对相同幅值的余弦波对应值按上述公式估计, 并据此求解 i 值, 按式(4)计算幅值 I_m , 其误差均在 0.1% 以下。对 $0^\circ \sim 90^\circ$ 间的典型角度分别求得估计值的相对误差 ε_1 , 结果如表 1 所示。

表 1 标准正弦波的估计值相对误差
Tab. 1 The relative errors of estimated value of standard sine wave

角度/ $^\circ$	0	15	30	45	60	75	90
$\varepsilon_1/\%$	0.000 2	0.039 1	0.067 9	0.078 5	0.080 5	0.039 3	0.000 1

如果考虑原始波形中有 5% 的谐波含量, 则瞬时误差最大可达 4% , 经一阶惯性环节的平滑滤波后, 平均值误差可以大为降低。

经实验室实测电压信号, 所测信号的谐波总含量为 2.1% , 3 次谐波含量为 0.6% , 5 次谐波含量为 0.5% 。对此含谐波的波形采用上述计算方法, 求得 $0^\circ \sim 90^\circ$ 间典型角度对应估计值的相对误差 ε_2 , 结果如表 2 所示。预计在高压故障短路时, 谐波含量不会超过 5% 。

表 2 含谐波波形的估计值相对误差
Tab. 2 The relative errors of estimated value of harmonic wave

角度/ $^\circ$	0	15	30	45	60	75	90
$\varepsilon_2/\%$	0.778	0.052	0.506	0.559	0.276	0.104	0.276

按现有积分初值的估计方法, 其精度受原始数据中的谐波含量影响较大, 如果估计不好, 渐近过程需时较长, 可达 $1 \sim 3 \text{ s}$ 左右。在其趋于稳定之前, 积分数据中呈现有不太大的缓慢衰减的非周期分量。为减小谐波影响, 并使渐近过程尽量缩短, 可对已有数据采取带通滤波后再做积分运算, 但仍然

避免不了初值估计问题。并非只有本算法存在初值问题, 所有这类从零起始而突加的信号过程都不可避免, 且只存在于初始一段时间, 只能设法缩短此过程。以目前的技术条件, 可将其缩短至 5~10ms。在建立过程中所计算的正弦波幅值误差可能稍大, 一般在 5%~7%左右, 但仍可用于保护判断。

对于电气计量, 需要计算的不仅是基波, 因此它的有效值是按 $\sqrt{(\sum_{N=1}^n i_N^2)/n}$ 来计算的, i_N 为 N 次谐波的电流有效值。而有功功率采用电压、电流瞬时值相乘求平均的办法来计算, 即 $(\sum_1^n ui)/n$, 视在功率为 $S=VI$ 。目前已有芯片可以采用, 为 Cirrus Logic 公司的 CS5463 芯片。它要求的输入量为 u 和 i 的模拟量, 其特点是采用 Σ - Δ 转换, 精度可达到 0.1 级(对于有效值和有功功率)^[21]。

2.3 算法对比分析

与传统加数据窗口的离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)计算方法相比, 上述计算简便, 可以大大缩短计算时间。

传统方法一次采样后的处理时间(在 150 MHz 主频的处理器中)约 800 μ s, 而现有的方法大约只需 10 μ s 以内的时间。传统的 DFT 方法在短路故障发生瞬间, 不能再用滚动的数据计算基波值, 需重新开数据窗口, 集满 1 个或 0.5 个(对半波 DFT)周期的采样数据后方可计算其有效值, 继电保护只能在短路后 10~20 ms 之后才能获得短路电流基波的有效值和相位数据。

本文计算方法只需在短路发生后 20~100 μ s(考虑到需要经过连续 10 次左右的计算值, 偏差不大于 5%)即可提供短路电流基波的有效值和相位数据。前述积分初值估计方法中, Δt 越小, 准确度会越高, 再加上抗混叠因素的考虑, 可以认为采样间隔时间选择在 10 μ s 是合适的。这是深度的过采样, 有利于最终精度的保证。整个系统按流水线方式作业, 对处理器芯片要求不太高, 一般用 180 MHz 主频的 ARM 型处理器即可满足使用。这种芯片中有多个 DMA(Direct Memory Access)控制器提供给用户, 对于数据交换很有利。

对于相位统合, 目前大多采用同步采样方式来解决。这种方式并不完全合适, 因为同步信号到达采样点的时间不能保证同时。另外, 同步控制过于集中也会带来可靠性和维修不便等问题。根据以上

论述, 可以采用单元线路的同步控制, 另外通过校验和调整, 使输出与一次量间保持零相移^[22]。

3 结论

1) 基于数字化变电站对继电保护功能的高要求, 将基本的数据处理(指基波电流、电压有效值及相位的获取)在合并单元内完成是合理的, 这有利于技术管理和调试工作的明确分工, 也有利于技术设施的改进及其作用的发挥。

2) 目前合并单元的关键技术在于交流有效值及相位的求取方法, 传统的 DFT 方法计算周期太长, 限制了继电保护水平的提高。本文提出的基于深度过采样(缩短采样周期)技术的用于 Rogowski 线圈输出信号的积分处理方法, 很大程度上提高了短路故障条件下电流有效值及相位的处理时间, 简便可行, 且同样适用于电压的处理过程。

参考文献

- [1] 高翔. 数字化变电站应用展望[J]. 华东电力, 2006, 34(8): 47-53. Gao Xiang. Application prospects of digital substations[J]. East China Electric Power, 2006, 34(8): 47-53(in Chinese).
- [2] 蒋年德, 魏育成. 变电站综合自动化系统体系结构研究[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 48-51. Jiang Niande, Wei Yucheng. Study on structure of integrated substation automation system[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 48-51(in Chinese).
- [3] 朱大新. 数字化变电站综合自动化系统的发展[J]. 电工技术杂志, 2001(4): 20-22. Zhu Daxin. The development of intergrated automation system of digital transformer station[J]. Electrotechnical Journal, 2001(4): 20-22(in Chinese).
- [4] 高翔, 张沛超. 数字化变电站的主要特征和关键技术[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 67-71. Gao Xiang, Zhang Peichao. Main features and key technologies of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 67-71(in Chinese).
- [5] 丁书文. 数字化变电站自动化系统的网络选型[J]. 继电器, 2003, 31(7): 37-40. Ding Shuwen. Choosing internal communication network of digital substation integrated automation system[J]. Relay, 2003, 31(7): 37-40(in Chinese).
- [6] 张沛超, 高翔. 数字化变电站系统结构[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 73-77. Zhang Peichao, Gao Xiang. System architecture of digitized substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 73-77(in Chinese).
- [7] 张永, 罗苏南. 数字式光电电流/电压互感器[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(6): 47-49. Zhang Yong, Luo Su'nan. Digital opto-electronic instrument transformers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(6): 47-49(in Chinese).
- [8] 赵美君. 电子式互感器应用技术的研究与设计[D]. 长沙: 湖南大

- 学, 2005.
- [9] 罗苏南, 田朝勃, 赵希才. 空心线圈电流互感器性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 108-113.
Luo Su'nan, Tian Zhaobo, Zhao Xicai. Performance analysis of air-core current transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 108-113(in Chinese).
- [10] 乔卉, 刘会金, 王群峰, 等. 基于 Rogowski 线圈传感的光电电流互感器的研究[J]. 继电器, 2002, 30(7): 40-43.
Qiao Hui, Liu Huijin, Wang Qunfeng, et al. The research of optical current transducer based on Rogowski coil[J]. Relay, 2002, 30(7): 40-43(in Chinese).
- [11] 周均德, 周有庆, 吴桂清, 等. 混合式光电电流互感器中 Rogowski 线圈传感头设计[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(7): 72-77.
Zhou Junde, Zhou Youqing, Wu Guiqing, et al. Design of Rogowski coil sensor head for hybrid optical current transducer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(7): 72-77(in Chinese).
- [12] 段雄英, 邹积岩, 张可畏. 电压/电流组合型电子式互感器的研究[J]. 电工技术杂志, 2002, 21(5): 9-12.
Duan Xiongying, Zou Jiyan, Zhang Kewei. Research on combined electronic current and voltage transducers[J]. Electrotechnical Journal, 2002, 21(5): 9-12(in Chinese).
- [13] 贾春荣, 邸志刚, 侯国强, 等. 一种新型电子式电流互感器模拟信号处理系统设计[J]. 电气应用, 2007, 26(1): 108-110.
Jia Chunrong, Di Zhigang, Hou Guoqiang, et al. A new design of analog signals disposal system for electronic current transformer[J]. Electrotechnical Application, 2007, 26(1): 108-110(in Chinese).
- [14] 杜天军. 基于抗混叠小波理论的电力系统谐波检测与抑制研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2005.
- [15] IEC60044-8, instrument transformers: Electronic current transformers[S]. 2002.
- [16] 王涛, 李红斌, 陈金玲, 等. 数字积分器在电子式电流互感器中的应用[J]. 电气应用, 2006, 25(5): 96-102.
Wang Tao, Li Hongbin, Chen Jinling, et al. The application of digital integrator electronic current transformer[J]. Electrotechnical Application, 2006, 25(5): 96-102(in Chinese).
- [17] 谢彬, 尹项根, 张哲, 等. 基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器的积分器技术[J]. 继电器, 2007, 35(3): 45-50.
Xie Bin, Yin Xianggen, Zhang Zhe, et al. Technology in designing integrator of electronic current transducer based on Rogowski coil[J]. Relay, 2007, 35(3): 45-50(in Chinese).
- [18] 邱红辉, 段雄英, 邹积岩. 基于数据融合的组合结构电子式电流互感器设计[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 14-20.
Qiu Honghui, Duan Xiongying, Zou Jiyan. Design of data fusion based electronic current transformer with combined structure[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 14-20(in Chinese).
- [19] 张可畏, 王宁, 段雄英, 等. 用于电子式电流互感器的数字积分器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 104-107.
Zhang Kewei, Wang Ning, Duan Xiongying, et al. A digital integrator for electronic current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 104-107(in Chinese).
- [20] Robinson R C. 动力系统导论: 华章数学译丛[M]. 韩茂安, 邢业朋, 毕平, 译. 北京: 机械工业出版社, 2007: 83-118.
- [21] 程剑平. 带通 Σ - Δ 调制器的研究和设计[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [22] 梅志刚, 罗承沐, 崔爱芳. 一种虚拟互感器校验仪的设计[J]. 变压器, 2006, 43(10): 25-28.
Mei Zhigang, Luo Chengmu, Cui Aifang. Design of virtual calibrator for instrument transformer[J]. Transformer, 2006, 43(10): 25-28(in Chinese).



王勇

收稿日期: 2008-09-23.

作者简介:

王勇(1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化与虚拟仪器技术, E-mail: wangjinjie34@163.com;

曹保定(1933—), 男, 教授, 研究方向为电力系统控制与量测;

姜涛(1985—), 男, 本科, 研究方向为电力系统自动化。

(编辑 李兰欣)

世界首个 ± 660 kV 直流输电工程开工

2008年12月15日, 西北(宁东)—华北(山东) ± 660 kV 直流输电示范工程开工仪式在宁夏银川、山东青岛胶州同时举行。该工程是世界上首个 ± 660 kV 电压等级的直流输电工程, 也是国家“西电东送”重点项目之一。工程将在实现西北与华北电网联网、西北黄河上游水电及宁东火电打捆送往山东、进一步实现资源优化配置等方面发挥积极作用。国家发改委副主任、国家能源局局长张国宝, 宁夏回族自治区党委书记陈建国、自治区政府主席王正伟, 山东省省委常委、常务副省长王仁元, 国家电网公司党组成员、副总经理郑宝森、舒印彪等出席开工仪式。

宁东—山东 ± 660 kV 直流输电工程西起宁夏银川东换流站, 东至山东青岛换流站, 途经宁夏、陕西、山西、河北、山东等五省(自治区), 线路长度为 1335 km。工程计划于 2010 年建成投运, 总投资 104 亿元。该工程是国家电网公司继 1 000 kV 特高压交流试验示范工程和 ± 800 kV 特高压直流工程后, 在世界尖端输电技术领域取得的又一重大成果。工程建成投运后, 可缓解山东省电力供应紧张、能源资源短缺的局面, 提高山东电网运行的经济性和可靠性; 有利于缓解煤炭运输压力, 减小山东省面临的环保压力, 整体上降低一次能源消耗; 同时将使西北与周边电网的联系更为紧密。该工程的建设, 也有利于推动直流输电技术发展, 促进我国直流装备制造技术升级。工程将在直流阀厅建设规模、单个 12 脉动阀组的容量、跨接耐受电压、晶闸管数量以及换流变压器的单台容量、运输重量等方面创造直流输电工程领域的世界纪录。