

Applications of Beidou Dominating Multimode System in Wide-Area Power Quality and Energy Efficiency

Kai Liu¹, Yan Liu¹, Yuting Fu², Rui Song²

¹China Electric Power Research Institute, Wuhan

²School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan

Email: xmli@whu.edu.cn

Received: Apr. 16th, 2014; revised: May 12th, 2014; accepted: May 23rd, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Modern power system structure is increasingly complicated, and there exists new challenges about the security of modern power grid, so the grid wide-area real-time monitoring of power quality will be more and more important. At the present stage grid mainly depends on the GPS to complete this task. But the GPS time synchronization accuracy and positioning precision is restricted by the United States, so the reliability is low and autonomy is poor. Based on security considerations, it is necessary to study Beidou dominating multimode system in which China's Beidou satellite navigation system is given priority to and it is compatible with a variety of navigation modes. This report analyzes the application of synchronous phasor measurement unit (PMU) in detail, and verifies that the application of new system can improve the measuring accuracy.

Keywords

Beidou Dominating Multimode System, Power Quality, Synchronous Phasor Measurement Unit (PMU), Measuring Accuracy

北斗主导多模系统在广域电能质量与能效分析方面的应用

刘 凯¹, 刘 艳¹, 付玉婷², 宋 锐²

¹中国电力科学研究院，武汉

²武汉大学电气工程学院，武汉

Email: xmli@whu.edu.cn

收稿日期：2014年4月16日；修回日期：2014年5月12日；录用日期：2014年5月23日

摘要

现代电力系统结构日趋复杂，现代电网的安全性存在新的挑战，电网的广域电能质量实时监控将越来越重要。现阶段电网主要依赖美国的GPS来完成。但GPS的时间同步精度和定位精度受美国限制，因此可靠性低、自主性差。基于安全性考虑，有必要对基于我国北斗卫星导航系统为主，兼容多种导航模式的北斗主导多模系统进行研究。本文详细分析了利用北斗主导多模系统的高精度授时系统如何提高电能质量监测水平和能效分析可靠性，并通过对比仿真实验验证了北斗主导多模系统的可行性。

关键词

北斗主导多模系统，电能质量，能效分析，同步采样

1. 引言

当前我国电网规模在快速扩大，大容量、超高压、特高压、远距离输电与日俱增，电网的结构和运行方式日趋复杂，从而对电力系统的监测与控制面临新的问题。在当前大电网背景下，如果电网出现大的扰动，若没有得到快速准确的监测与控制，就会使电网的稳定性遭到破坏，产生大面积的停电事故，导致国民经济造成的巨大损失和严重的社会危害。

同时，随着国民经济的发展，电能质量和能效问题逐渐受到电力企业和电力用户的共同关注。建立电能质量监测系统，对电能质量进行长期、连续的监测，全面掌握电能质量状况，从而为改善电能质量提供依据是十分必要的。

应用先进技术来解决电网日趋复杂的技术难题就成了必然选择。北斗主导多模系统具有精确授时功能，且数据传输具有便捷性、稳定性、快速性等特点，将其应用到电力系统中，可以为电力系统提供高精度、全天候、高效率的授时，从而使电能质量的远程动态实时监测成为可能。

2. 北斗主导多模授时系统

2.1. 北斗卫星导航系统的优势

与GPS相比，北斗卫星导航系统有着明显的应用优势。首先，北斗系统是我国具有自主知识产权的卫星导航系统，摆脱了他国导航系统对本国的约束；其次，北斗系统具有双向通信能力，能独立完成对移动目标的定位、调度、监控和指挥，没有通信盲区；第三，北斗系统中心站可以保留全部北斗终端用户机的位置及时间信息，同时，卫星导航增强系统中心站也实时存储有大量非常有价值的差分数据；另外，该系统采用码分多址制式技术，抗干扰能力较强，优于现有的其它卫星导航系统。

2.2. 北斗主导多模系统的概念与优势

尽管北斗系统有以上优势，相比技术成熟的GPS导航系统，北斗系统在用户容量、生存能力、数据的共享性和性能价格比方面存在技术缺陷，因此单一的北斗导航系统将无法满足应用的需求，需要同其

他导航系统结合起来才能更好的发挥其优势。

北斗主导多模系统是以全天候、全天时提供卫星导航定位信息的北斗导航系统为主导，GPS、GLONASS、伽利略等多种导航模式同步协作的卫星导航系统。相比GPS等单一的卫星导航系统而言，集成了多个卫星导航系统的多系统兼容导航系统有着更为出色的工作性能。由于多卫星导航系统的兼容工作，使得同一地区空间范围内的可见卫星数得到了大幅度的提高，从而使整个系统的连续性、可用性、可靠性、授时精度以及工作效率等各方面都更具优势，这使得多系统兼容导航成为未来卫星导航发展趋势[1]。

2.3. 北斗主导多模系统在电力系统数据采集中的授时应用

广域电能质量测量系统主要有测量装置、通信系统和位于调度中心的主控单元组成。如图1所示。

借助于北斗多模系统的精确授时功能，在电力系统的各个重要的监测点上，由相应的带有PMU (Phasor Measurement Unit, 电力系统同步相量测量单元)的数据采集装置采集带统一时标的电压、电流信号等，以实现高精度的同步测量，再通过ATM交换机接入光纤网络，最后到达调度中心的主站上。同时各个子站也可以在各自的监控系统后台上获得相应的信息，为电力系统的人员提供电能质量分析服务。

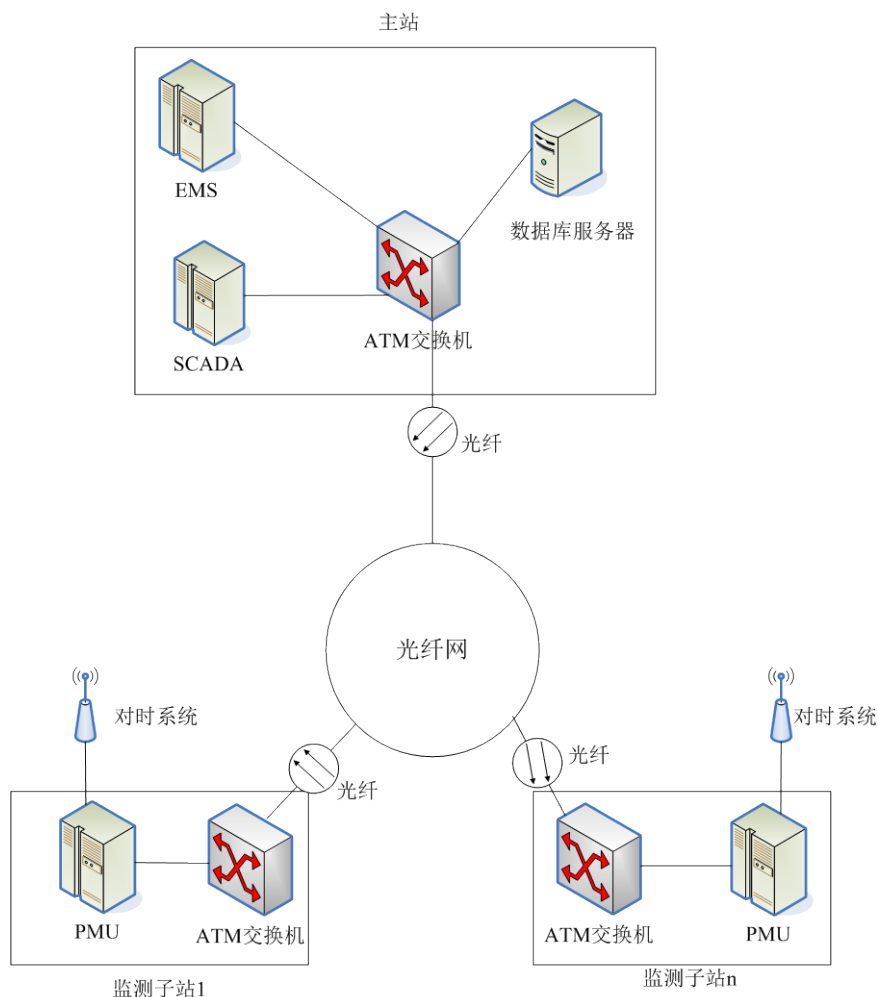


Figure 1. The wide area power quality measurement system structure diagram
图 1. 广域电能质量测量系统结构示意图

3. 北斗主导多模授时系统在广域电能质量与能效分析中的应用

电网结构越来越复杂使得电网安全稳定运行面临严峻挑战，调度运行人员对电网特性的把握也越来越依赖于基于电网模型的实时监测分析。准确的电网参数是形成准确的电网模型，进而进行状态估计、潮流计算、网损分析、故障分析和继电保护整定计算等电力系统计算的基础[2]。因此，实时准确监测电网参数引起了越来越多的关注。

3.1. 电压偏差方面的应用

电压相量是电力系统的一个重要参数，其中母线电压相量是系统运行的主要状态变量，是系统能否稳定运行的标志之一[3]。

电压相量包括幅值、频率和初始相角三要素，电压瞬时值公式为

$$u = U_m \sin(\omega t + \phi_0) \quad (1)$$

电压的幅值和频率是保持不变的，且能方便地被测量，但由于电压的相角 $\phi = \omega t + \phi_0$ 是时刻变化的，所以对其进行测量实时性要求很高，前面已说明同步时钟精度对于误差大小的重要性，由于传统的时钟精度低，再加上通讯技术和计算机技术水平的限制，相角测量一直都存在较大偏差。

北斗主导多模授时系统所提供的同步时钟精度小于 $1 \mu\text{s}$ ，对于 50 Hz 的工频信号其相位误差不超过 0.018° ，从而为电力系统提供了统一的高精度时钟标准，且其可靠性高，使电压相量的同步测量成为可能。

将北斗应用到同步相角测量中，本文采用一种比较直观的同步相角测量方法—过零测量法，该法只需将被测工频信号的过零时刻与某一时间标准相比较即可得出相角差。目前市场上北斗时钟信号接收模块的秒脉冲(1PPS)上升沿的精度误差在 $\pm 1 \mu\text{s}$ 之内，对于 50 Hz 的工频其相位误差在 $\pm 0.018^\circ$ [4]，在允许的相位误差范围之内。将电压过零点时刻与 1PPS 相比较，便能得到相对于 UTC(Coordinated Universal Time, 协调世界时间)的各节点电压相角，如图 2 所示。

图 1 中，对于 50 Hz 的工频信号，子站相对于参考站的电压相角差为：

$$\delta = \frac{360^\circ}{20\text{ms}}(T_2 - T_1) \quad (2)$$

显然，同步采样时钟精度体现在公式中的 $T_2 - T_1$ 的差值上，即精度为 0.1 ms 时， $T_2 - T_1 = 0.1\text{ms}$ ；精度为 $1 \mu\text{s}$ 时， $T_2 - T_1 = 1\mu\text{s}$ 。当电压过零时，顾名思义其实际瞬时值应为零，但由于采样同步时钟的误差，导致电压瞬时值偏移零值。

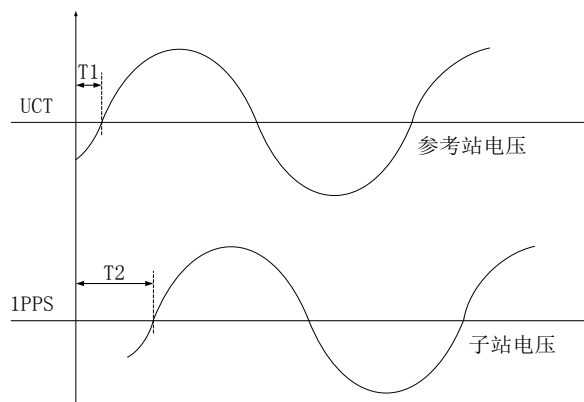


Figure 2. The principle of phase Angle measurement algorithm
图 2. 相角测量算法原理

假设电压的幅值 $U_m = 380V$ ，则瞬时电压变为：

$$u = 380 \sin \delta = 380 \sin \left[\frac{360^\circ}{20ms} (T_2 - T)_1 \right] \quad (3)$$

当精度为 0.1 ms 时，子站相对于参考站的电压相角差为 1.8° ，则实测过零时的瞬时电压值为 $u = 380 \sin 1.8^\circ \approx 11.94 \text{ v}$ ；当精度为 $1 \mu\text{s}$ 时，子站相对于参考站的电压相角差为 0.018° ，则实测过零时的瞬时电压值为 $u = 380 \sin 0.018^\circ \approx 0.1194 \text{ v}$ 。可见后者求出的电压与实际值的偏差比前者小很多，测量精度大大提高，完全满足要求。

上面讲的电压偏差的原理同样适用于对谐波的测量。对谐波的测量包括母线谐波电压、支路谐波电流和注入谐波电流测量，由于谐波各电气量的幅值和频率是保持不变的，且这两个量都很方便的测出，故对谐波的监测就是对其各电气量的相位进行实时同步监测，所以采样同步时钟的精度同样决定了相位误差的大小，北斗主导多模系统的高精度授时则使谐波电气量相位测量的精度大大提高。

3.2. 变压器参数识别方面的应用

传统的变压器参数辨识方法一般是基于 SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition, 数据采集与监视控制)数据，但此数据不具有全网统一的时间标识，且基于此数据的参数辨识需要利用全局的量测来确定全局的参数，因此，如果采样不同步则会对状态分析将造成很大的误差。实际工程中，由于缺少实测参数而直接采用设计参数，这将导致设备参数的使用值存在误差，从而严重影响状态估计的精度和结果的可信度。作为电网运行中的主要电气设备，实时监控变压器的各项参数从而掌握变压器的运行状态是电力系统亟待解决的问题。

变压器参数在线识别的原理是根据变压器绕组的短路电抗在正常运行时不发生变化，而在变压器内部故障时发生变化的特性，应用辨识理论通过变压器三相电压及电流的实测值来辨识绕组的短路电抗，将辨识结果与正常时的三相绕组的短路电抗进行对比，可以确定绕组是否异常及故障发生的部位，保证变压器元件得到及时更换，防止变压器非正常退出运行[5]。短路电抗在线监测，具有实时、不受干扰和判据简单明确等特点，在实际运行中能够为绕组状况提供实时准确的显示，这样就能够提前准备检修或在必要时使变压器及时退出运行，对于延长变压器寿命及避免事故发生具有重要的意义，具有较好的应用前景。

目前，最具前景的方法是利用相量测量单元 PMU 结合 GPS 提供的全网范围内的精确同步时钟，然后根据从 PMU 装置获取的变压器数据来分析对变压器实时监测。然而，如果将北斗多模系统应用于电力系统中，可弥补使用 GPS 作为唯一同步时钟源的可靠性问题[6]。

设变压器一次侧测量的电压电流相角差为 ϕ_1 ，二次侧测量的电压电流相角差为 ϕ_2 ，忽略励磁阻抗，则：

$$R_T = \frac{U_1 \cos \phi_1 - U_2 \cos \phi_2}{I_1} \quad (4)$$

$$X_T = \frac{U_1 \sin \phi_1 - U_2 \sin \phi_2}{I_1} \quad (5)$$

由公式可知，由于电压电流有效值基本不变，所以短路电抗的实测值与变压器两侧的相位有很大关系。正确测量变压器两侧的相位，则可得到真实的短路电抗，与变压器给定的短路电抗进行比较，从而判断变压器是否变形或者发生故障。

3.3. 网损和能效分析方面的应用

能效好坏可通过网损率的大小来反映，网损计算的准确与否将极大的影响能效分析的准确性。为响应电力节能环保的政治要求，准确计算网损，合理改善能效势在必行。

网损计算的原始数据分为两类：一是有关电力系统结构的元件参数及拓扑图，二是有关电力系统运行的数据，包括电流、电压、功率因数、有功和无功功率等。其中，前者通常是不变的，而后者变化很大且具有随机性。

设总误差为 100%，则原始数据不准确造成的误差为 82%~84%，数学模型不精确造成的误差为 14%~15%，数学方法不精确造成的误差为 2%~3%[7]。显然，原始数据准确与否极大的影响着网损计算的精确性，因此必须采用精确的授时系统为数据打上时间标签，以保证数据采集的同时性与准确性。将北斗导航系统应用到电网 SCADA 系统，高精度的同步授时加上 SCADA 的遥测技术取得电力系统的实时数据，大大提高了网损计算的准确性、实时性。图 3 为相量测量单元在线路中的位置图。

4. 电压偏差方面应用的仿真研究

4.1. 原始数据与假设条件

图 4 为构建的网络接线图，变电所 A 选取 2 台 SSPSL-50000/220，变电所 B 选取 2 台 SSPSL-120000/220，变电所 C 选取 2 台 SSPSL-90000/220，联络变压器选取 1 台 SSPSL-150000/220[8]，使用 MATLAB 进行建模仿真，同步检测得到各节点的电压、电流、有功、无功等的实时数据，通过对比电源侧和负载侧的实时数据的差值即可知道整个电网的损耗。

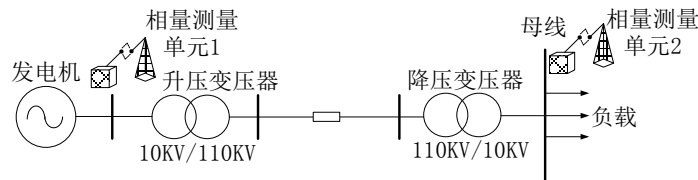


Figure 3. Phasor measurement unit locations
图 3. 相量测量单元位置图

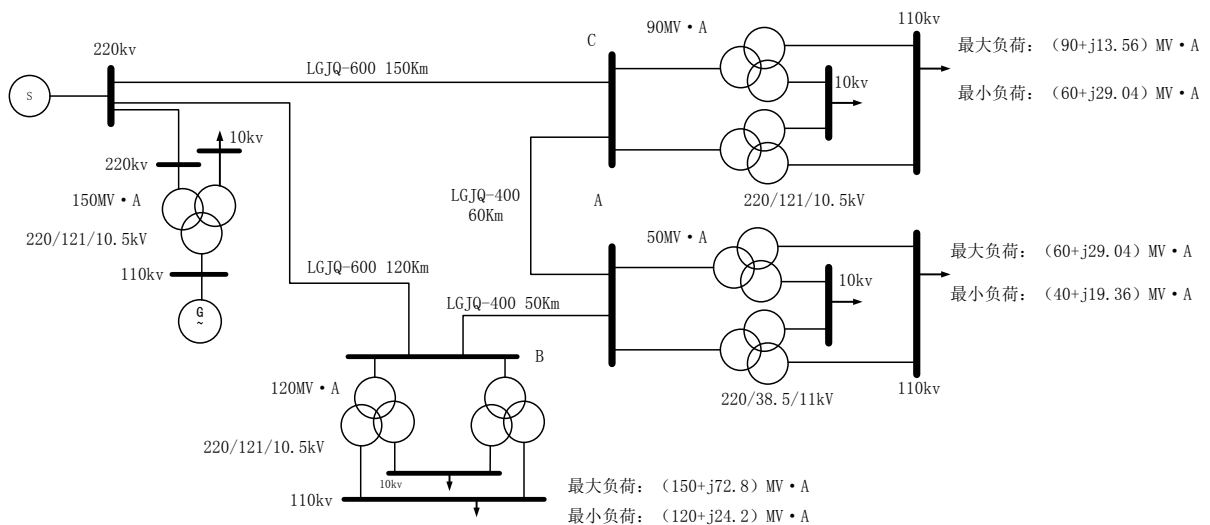


Figure 4. Network wiring diagram
图 4. 网络接线图

4.2. 仿真过程

通过 MATLAB 建立仿真模型，实时采集电源侧和负荷侧的电压、电流、有功功率、无功功率，即可计算出每一时刻电网的真实功率损耗水平，并与不同时间同步精度下的误差值进行对比，即可知道时间同步精度对网损计算和能效分析的影响，从而体现出利用北斗同步授时的优势。

由于同步误差的随机性，当未使用北斗系统时，同步误差在 $-0.1\text{ ms}\sim+0.1\text{ ms}$ 之间浮动，使用北斗系统以后，同步误差在 $-0.1\text{ }\mu\text{s}\sim+0.1\text{ }\mu\text{s}$ 之间浮动。为了保证实验的真实性，对每个测量节点的电压电流测量同步误差进行随机抽样，表 1 为不同时间误差对电压电流相位差的影响。

4.3. 仿真结果

表 2 为真实 P、Q 值和测量精度分别为 0、0.1 ms 和 1 μs 时，在计算的真实相位差的基础上加上同步相位误差后，通过计算所得的 P、Q 值，表 3 为不同同步精度下的年计量误差对比。

Table 1. Different time precision voltage current phase difference

表 1. 不同时间精度的电压电流相位差

节点		电源 1	电源 2	负荷 1	负荷 2	负荷 3
1ms/18°	相位差	0.72	-2.7	0.9	3.06	-1.26
1 μs /0.018°	相位差	-0.009	0.0108	-0.027	0.0198	-0.0144
节点		负荷 4	负荷 5	负荷 6	负荷 7	
1ms/18°	相位差	-0.36	-1.8	-1.08	0.72	
1 μs /0.018°	相位差	-0.0036	-0.0252	-0.0288	0.0216	

Table 2. Synchronization accuracy respectively at the time of 0, 0.1 ms and 1 μs P and Q value

表 2. 同步精度分别为 0、0.1 ms 和 1 μs 时的 P、Q 值

测量参数	cos Φ			P(MW)			Q(MVar)		
	0	1 μs	0.1 ms	0	1 μs	0.1 ms	0	1 μs	0.1 ms
电源 1	0.8185	0.8186	0.8112	353.3	353.34	350.16	248	247.94	252.42
电源 2	0.4952	0.4950	0.5356	42.99	42.98	46.50	75.42	75.43	73.31
负荷 1	0.8499	0.8501	0.8415	9.932	9.93	9.83	6.158	6.15	6.31
负荷 2	0.8512	0.8511	0.8220	9.993	9.99	9.65	6.16	6.16	6.68
负荷 3	0.9421	0.9422	0.9492	135.5	135.51	136.53	48.23	48.20	45.24
负荷 4	0.9012	0.9013	0.9039	73.67	73.67	73.89	35.42	35.42	34.96
负荷 5	0.8505	0.8507	0.8666	9.929	9.93	10.12	6.14	6.14	5.83
负荷 6	0.8984	0.8986	0.9065	48.97	48.98	49.41	23.94	23.92	23.01
负荷 7	0.8478	0.8476	0.8410	10.23	10.23	10.15	6.4	6.40	6.53

Table 3. Different synchronization error comparison table

表 3. 不同同步误差对比表

同步精度	总输入有功 Pin(MW)	总输入无功 Qin(MVar)	总输出有功 Pout(MW)	总输出无功 Qout(MVar)	功率损耗 Δ P(MW)	年损耗电能 Δ A(MWh)	年同步误差 (MWh)
0	396.29	323.42	298.224	132.448	98.066	859058.16	0
1 μs	396.32	323.37	298.24	132.39	98.08	859180.8	122.64
0.1ms	396.66	325.73	299.58	128.56	97.08	850420.8	8637.36

由表可知,使用北斗系统使同步精度大幅度提高以后,由于同步误差导致的年电能误差只有 122.64 MWh,按每 1 KWh 的电 0.8 元的电费计算,每年由于同步误差导致的费用计算错误约为 9.8 万元。而在未使用该系统之前,由于同步误差较大,导致的年电能误差高达 8637.36 MWh,折合成电费为 691 万元,如此大的误差给工作人员进行网损计算和能效分析都带来了很大的不利因素。

在北斗系统 1 us 的同步精度下,测量数据近似等于真实数据,可真实反映电网各项参数指标,能为电网广域电能质量和能效检测与分析提供正确可靠的数据。

5. 结论

北斗主导多模系统既具有北斗的优势,又兼具其他导航系统的优势,且为我国自主研发的系统,摆脱了其他国家对我们的束缚,从而具有很强的安全可靠。将其用到电力系统中,实现了对系统的实时动态监测,且其授时精度高,使得对各参数的测量更加精确,从而使结果更具说服力。

本文通过北斗授时系统在电压偏差、变压器参数识别以及网损与能效分析方面的具体应用,对北斗授时系统的应用价值以及精度改善原理进行了更为详细的讲解,可以看出,将北斗主导多模授时系统应用到电力系统广域电能质量与能效分析中,提高了电能质量监测水平和能效分析可靠性,实际意义重大。

在不久的将来,北斗主导多模授时系统将会应用到电力系统的各个领域,使监测的可靠性与准确性大大提高,对电力系统的实时动态监测是一场更为深远的变革。

参考文献 (References)

- [1] 杨一民 (2010) 多频段卫星导航系统中的印制四臂螺旋天线. 硕士论文,大连海事大学,大连.
- [2] 王茂海 (2009) 基于 PMU 实测数据的输电线路参数在线辨识方法. 中国电机工程学会年会,北京,2009 年.
- [3] 段俊东,戚新红 (2009) 电压相角测量算法综述. *自动化技术与应用*, **4**, 32-36.
- [4] 周捷 (2002) 母线电压同步相角测量算法研究及实现. *继电器*, **3**, 44-48.
- [5] 白静 (2007) 变压器绕组参数辨识研究. 硕士论文,沈阳工业大学,沈阳.
- [6] 邸变连 (2010) 基于单片机和 DSP 的交流电量同步采集器的研究. 硕士论文,华北电力大学,保定.
- [7] 郑芳 (2007) 河北南部电网网损分析系统的设计与实现. 硕士论文,北京邮电大学,北京.
- [8] 王小波,刘德强 (2009) 220kV 高压电网接线设计. *电力学报*, **4**, 57-61.