

실시간 계통제어를 위한 동기위상측정장치 개발

전진홍*, 김학만*, 전영환*, 국경수*, 김지원*, 오테규**

*한국전기연구소 FACTS & Power Quality 연구 Group, **한국전기연구소 전력연구단

The development of synchronized phasor measurement device for real time power system control

Jin-Hong Jeon, Hak-Man Kim, Yeonghan Chun, Kyung-Soo Kook, Ji-Won Kim, Tae-Kyoo Oh
Power System Research Division, Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - In real-time power system control, it is essential to measure the power system variables which are voltage, current, real and reactive power, power factor, system frequency and etc. this variables can be estimated or calculated by the synchronized phasor information of voltage and current. Therefore, the synchronized phasor measurement of voltage and current is very important to real-time power system control. So, we develop SPMD(Synchronized Phasor Measurement Device) for synchronized phasor measurement of voltage and current. In this paper, we present the design and implementation of SPMD for real-time phasor measurement and prove its performance by the test results.

장치 개폐, FACTS 장치의 제어, 변압기 탭 변환 등을 제어하는 신개념의 정보, 제어 집약 계통 기술을 말하며, 그 개념을 간략히 도면으로 나타내면 그림 1과 같다 [1-3].

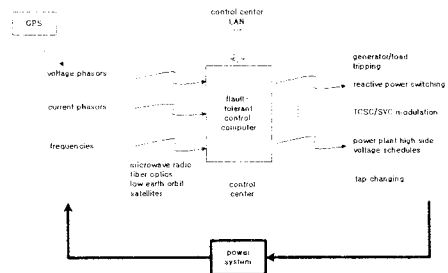


그림 1. 실시간 계통 제어 구성

1. 서 론

전력산업의 구조개편에 의한 경쟁체제의 도입 등과 같은 계통여건의 변화는 전력계통을 정보집약형 시스템으로 발전하도록 촉진하고 있으며, 이를 위한 계통상황에 대한 실시간 정보의 취득 및 활용의 인식이 증대되고 있다. 또한, 계통 규모의 확충과 대전력 수송 및 전력 수송 밀도의 고도화가 진전됨에 따라 계통의 안정성과 효율성을 향상시키기 위해서 안정화 제어장치, FACTS 설비, 신EMS(Energy Management System), 등 각종 계통 운용제어 시스템 기술의 도입이 추진되고 있다. 이러한 신기술을 전력계통의 계획, 운용 및 제어에 적용하기 위해서는 신속, 정확한 전력계통의 특성과, 고신뢰성의 모형 수립 및 검증, 신속한 적용효과 파악 등이 요구된다[1][2][3]. 이를 위해서는 전압, 전류, 유·무효전력, 역률, 위상각, 계통 주파수 등의 전력계통의 상태변수 추정이 필수적이고, 이러한 상태변수들은 전압·전류의 동기된 페이지 정보들로부터 계산하거나 추정할 수 있다. 그러므로, 전력계통의 실시간 제어나 감시를 위해서 전압·전류 페이지의 동기측정은 매우 중요한 요소이다[1]. 본 논문에서는 전압·전류의 실시간 페이지측정을 위한 동기위상측정장치의 설계와 구현에 대하여 설명하고 제작된 동기위상측정장치의 실험결과를 이용하여 그 성능을 검증하여 보았다.

2. 본 론

2.1 실시간 계통 제어

실시간 계통제어는 그림 1에서 보이는 바와 같이 GPS에서 수신된 시각을 이용한 동기된 전압, 전류의 위상 정보를 동기위상 측정장치를 통해서 취득하여 중앙센터로 전송되면 중앙센터에서 이 정보를 이용하여 안정도 및 계통 외란 유·무 등을 해석하여 계통의 제어가 필요할 경우, 목적에 따라 발전기/부하 절체, 무효전력 보상

2.2 동기위상측정장치

본 연구에서 개발된 동기위상측정장치는 PT와 CT에 의해 측정된 전력계통의 순시전압과 순시전류를 입력으로 GPS 시각에 동기된 sampling을 수행하고 그 결과로 얻어진 데이터를 적절한 알고리즘을 통해 입력된 순시전압과 순시전류의 실효치와 위상 등의 정보를 추정한 후 그 결과를 외부로 전송하는 기능을 가지는 장치이다.

2.2.1 사양(Specification)

동기위상장치는 표준화 관점의 기술규격에 의거해서 설계 및 제작되어야 한다. 동기위상측정장치에 대한 기술규격으로서는 IEEE Std 1344-1995(IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems)가 있으며, 추후 타 장치와의 연계 또는 확장성을 고려하여 IEEE Std 1344-1995에 근거하여 설계하였다[1][4]. 표준화 기술규격[5][6]과 시작품 성격을 고려하여 본 연구에서 제작된 동기위상측정장치의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 동기위상측정장치 주요 사양

| 항목 | 사양 |
|---------------------|--------------------------------------|
| 아날로그 입력 채널 | 12 개 (1모선 3라인 기준) |
| 아날로그 신호 conditionig | 2차 저역통과 필터 (차단주파수 : 5kHz) |
| A/D Converter | 1.25MHz, 12 Bit |
| DSP | TMS320C32-60 (Floating Point 연산용) |
| RAM | 128k×8bit |
| GPS | Motorola UT 모델 |
| 페이지외부전송 | 25핀 RS232 외부 전송 포트(19.2k) |
| GPS 모듈 인터페이스 | 9핀 RS232 인터페이스 |
| 지연시간 | 1 μsec[6][7] |

2.2.2 구성 및 시제품

동기위상측정장치는 크게 4부분(DSP & 주변회로, 아날로그 입력회로, EPLD 회로, GPS module)으로 구성되어 있으며 각 부분의 구성 및 상호 연관관계는 그림 2와 같다.

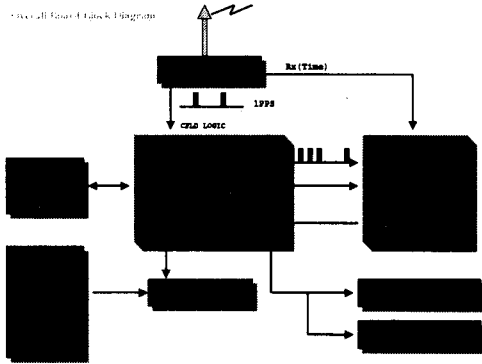


그림 2. 동기위상장치의 전체구성

제작된 동기위상측정장치는 TMS320C32(60MHz)의 부동소수점연산용 DSP를 주연산장치로 사용하였으며 12개의 아날로그 입력단자와 6개의 디지털 입력단자, 4개의 아날로그 출력단자를 가진다. 아날로그 입력단자는 전력계통의 순시전압과 순시전류를 PT와 CT로부터 받아들이며 디지털 입력단자는 데이터 통신 기능을 수행하며 아날로그 출력단자는 시스템 및 알고리즘의 디버깅을 위해 사용한다[1]. 입력신호의 GPS 시각동기를 위한 GPS 수신장치는 상용화된 GPS 수신장치 중 정밀 시각용으로 제작된 Motorola사의 UT Oncore GPS Module을 사용하였으며, 사용된 Module은 130nSec 이하의 정밀도를 보장하는 1 PPS 신호를 제공한다[7]. 본 연구에서 제작된 prototype 동기위상측정장치는 그림 3과 같다.

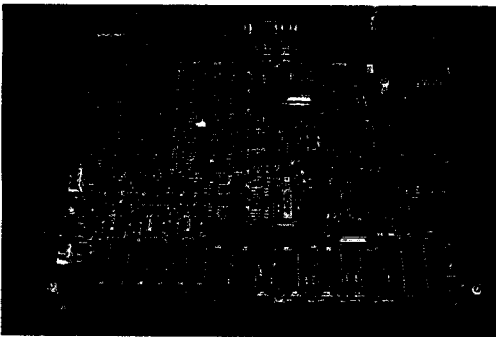


그림 3. prototype 동기위상측정장치

2.2.3 시각동기

여러 지점에서 동기된 측정 데이터를 얻기 위하여 동기 위상측정장치는 GPS수신기로부터 기준동기신호, 1PPS를 받는다. 1PPS는 동기위상측정장치에 아날로그 입력을 샘플링하기 위한 트리거 신호로 이용되고 이 신호를 기준으로 DSP 보드 내의 타이머가 구동되어 관련된 연산루틴을 수행하게 된다. 1PPS 신호에 동기된 데이터 샘플링을 위한 인터럽트 타이밍 다이어그램은 그림 4와 같다.

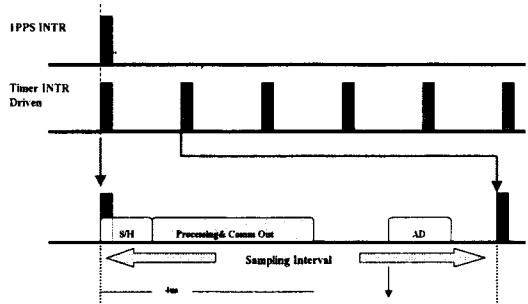


그림 4. 동기된 데이터 샘플링을 위한 인터럽트 타이밍 다이어그램

동기위상측정장치는 시각동기를 이루기 위하여 외부 GPS 수신기로부터 1PPS의 시각동기신호를 수신하며 이를 적절히 DSP 칩에 인식시키기 위하여 DSP 인터럽트를 이용한다. 이러한 인터럽트의 상관관계를 고려하여 동기위상장치의 전체 타이밍 오차를 계산하여 보면 다음과 같다[1].

- GPS수신기의 오차 : $\pm 160 \text{ nsec}$
- 1PPS 인터럽트 : 495 nsec
($8 * 33 \text{ nsec}$ (지연) + $5 * 33 \text{ nsec}$ (인식) + $2 * 33 \text{ nsec}$ (타이머 구동명령))
- \therefore 최대 인터럽트 지연 : $160 + 495 = 655 \text{ nsec}$
- \therefore 최소 인터럽트 지연 : $-160 + 495 = 335 \text{ nsec}$

2.2.3 동작 알고리즘

1 PPS 동기된 데이터 측정 및 연산을 위한 동기위상측정장치의 내부 동작 알고리즘은 그림 5와 같다.

- Start : 초기 동기위상측정장치를 기동한다.
- Initialize Reg : DSP칩의 외부 인터페이스를 위한 프로그램 초기화.
- Enable 1PPS : 1PPS 신호를 DSP 인터럽트와 연결하기 위한 기동신호
- Execute INT1 ISR : 인터럽트 1의 서비스루틴을 실행
- Main Execution : Phasor 연산과 통신관련 기능 수행

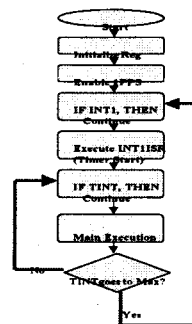


그림 5. 1PPS 동기에 의한 동작 알고리즘

2.2.3 페이저 측정 알고리즘

본 연구에서 개발된 동기위상측정장치는 순시 전압, 전류로부터 각 신호의 페이저 정보를 추출해내는 장치이다. 이를 위해서 순시 신호로부터 페이저 정보를 추출해내기 위한 알고리즘이 필요하고, 대표적으로 zero-crossing을 이용하는 방법과 DFT 알고리즘을 이용하는 방법을 많이 사용해 왔다[2,8-10]. 각 알고리즘의 특성 및 장단점은 참고문헌에 상세히 나와 있다. 본 연구에서는 입력신호의 페이저를 측정하기 위하여 동기

회전을 이용한 회전축 dq-변환을 이용하였으며 기준좌표의 동기회전을 위해 PLL(Phase Locked Loop) 알고리즘을 적용하였다. 이들의 상호 연관관계는 그림 6과 같다.

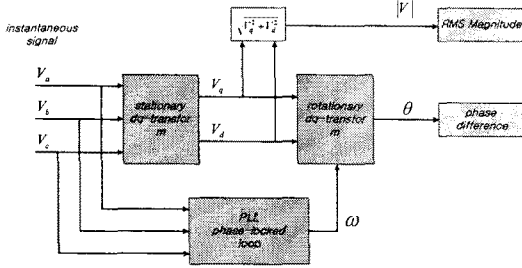


그림 6. dq-변환을 이용한 페이저 측정 알고리즘

2.3 동기위상측정 실험

본 연구에서는 두 가지 서로 다른 실험을 통해 제작된 동기위상측정장치의 페이저 측정 성능을 검증하고자 한다. 먼저 동기위상측정장치에 스텝으로 변화하는 입력을 가하여 그 응답특성을 검토하고, 얻어진 응답특성을 통해 과도상태에서의 순시 페이저 측정 성능을 검증하였으며, 실제 한전 계통에 연계되어 있는 실험장치에 흐르는 전류와 가해진 전압을 입력으로 하여 전압과 전류의 페이저를 측정함으로써 정상상태에서 왜란 및 잡음에 대한 동기위상측정장치의 순시 페이저 측정 성능을 검증하고자 한다[1][4].

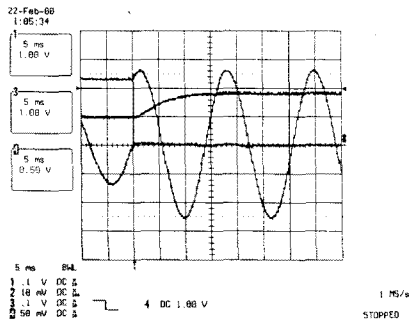


그림 7. 과도 상태에서의 페이저 측정 결과
(10ms/div, 25°/div, 9kA/div)
(ch1: Ia, ch3: 실효치 크기, ch4: 위상각)

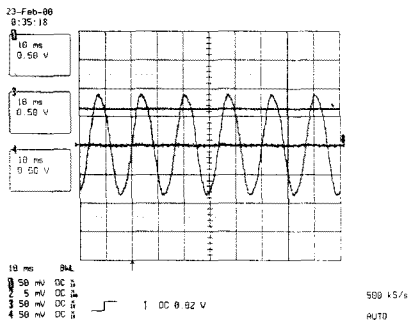


그림 8. 정상상태에서의 페이저 측정 결과
(5ms/div, 2.25/div, 100°/div)
(ch1: Ia, ch3: 실효치 크기, ch4: 위상각)

그림 7의 실험결과는 RTDS를 이용하여 페이저가 스텝으로 변화하는 입력을 동기위상측정장치에 인가한 후 그 결과를 나타낸 것이다. 그림 8의 실험결과는 실제 한전 모선에 저항부하를 연결하여 페이저를 측정된 것이다. 이 때, 전압의 크기는 360V(선간전압), 위상각은 0°(기준)으로 입력전압의 주파수 변동이나 파형의 왜곡, 잡음에 관계없이 거의 일정하게 나타나고 있다. 전류의 크기는 2.75A(206V/75Ω), 위상각은 0°(동상)으로 예상 결과와 일치하였다(Multimeter와 Clamp Meter에 의한 실효치 측정값과도 일치하였다.). 그림 7과 그림 8의 결과로부터 제작된 동기위상측정장치는 입력신호의 주파수 변동이나 파형의 왜곡이나 잡음의 영향에 대하여 강인하며, 시스템의 과도상태에서 전압과 전류의 순시 파형의 변화에 따라 페이저를 빠르고 정밀하게 추정하고 있음을 알 수 있다[1][4].

3. 결론

본 논문에서는 실시간 계통제어의 기본개념과 계통의 동기위상측정을 위해 제작된 prototype 동기위상측정장치의 사양, 구조 및 성능에 대하여 제시하였다. 제작된 동기위상측정장치의 성능 검증을 위해 두 가지 실험을 하였다. 주파수 추종, 잡음 및 왜형에 대한 성능 평가를 위해 실제 상용전원에 부하를 인가하여 그 성능을 검증하였으며, 동기위상측정장치의 과도상태 응답특성 및 성능 평가를 위해 RTDS와 연계하여 스텝 응답특성을 검토하여 보았다. 위의 두 가지 실험을 통해 제작된 동기위상측정장치가 정상상태 및 과도상태에서도 우수한 페이저 측정성능을 가지고 있음을 보였다. 향후 연구에서는 동기위상측정장치를 이용하여 측정된 페이저 정보를 통신하는 통신기능과 다수개의 동기위상측정장치를 이용한 시스템 상태감시 및 제어에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

(참고 문헌)

- [1] 한국전기연구소, 실시간 전력계통운용제어시스템 기술 개발, pp93-119, 2000년
- [2] 이영운 외 7인, "전력계통 실시간 감시를 위한 동기위상 측정장치", 전력계통 연구회 춘계학술대회 논문집, pp87-90, 1999년
- [3] 이재조 외 7인, "광역계통 위상 측정 시스템 구성을 위한 통신망 설계 기법", 전력계통 연구회 춘계학술대회 논문집, pp98-101, 1999년
- [4] 전진홍 외 5인, "실시간 계통제어를 위한 동기위상측정장치의 페이저 측정", 전력계통 연구회 춘계학술대회 논문집, pp81-84, 2000년
- [5] IEEE Power Engineering Society, IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., May 1996.
- [6] IEEE Power Engineering Society, IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., October 1991.
- [7] Oncore User's Guide, Motorola Press, 1996
- [8] A.G. Phadke et al, "A New Measurement Technique for Tracking Voltage Phasor, and Rate of Change of Frequency" IEEE 1993.
- [9] R. Jay Murphy and R.O.Burnett, Jr., "Phasor Measurement Hardware and Application", 48th Annual Georgia Tech PROTECTIVE RELAYING CONFERENCE Georgia Institute of Technology Atlanta, Georgia May 4-6, 1994.
- [10] R. Jay Murphy and Patrick S. Sterlina "Phasor Measurement Instruments" Precise Measurements in Power Systems Alington, Virginia October 27-29, 1993.