

개별 전로 전력 계측을 위한 디지털 신호처리 프로세서 기반 전력 관제 시스템의 제작 및 평가

Fabrication and Evaluation of Digital Signal Processor for Multi-Lane Energy Measurement System

김근준*, 강봉순*

Geun-Jun Kim*, Bongsoon Kang*

Abstract

Due to the development of society, the demand for electric power has increased and the quality control of electric power has become an important issue. In order to efficiently perform such power management, we propose a DSP based power measurement system for multi-wire power measurement. Since the conventional power measurement system can measure only the power of one line, a power quality measurement device is required for each line in order to measure the power quality of the individual line. Respectively. The system proposed in this paper proposes a system capable of real-time measurement of power quality at up to 12 points using digital signal processing algorithm, and the prototype based on this system was evaluated through the official test report of Korea Electrotechnology Research Institute. As a result of the performance test, it was evaluated that the error range is excellent at $\pm 0.3\%$.

요약

사회의 발달로 인하여 전력에 대한 수요가 증가함과 동시에 전력의 품질 관리가 중요한 문제로 부상하였다. 이러한 전력 관리를 효율적으로 수행하기 위하여 본 논문에서는 다선로 전력 계측을 위한 DSP 기반 전력 측정 시스템을 제안한다. 종래의 전력 계측 시스템이 하나의 선로의 전력만을 측정할 수 있었기 때문에, 개별 선로에 대한 전력 품질 측정을 위해서는 선로마다 전력 품질 측정 장치가 필요로 하였으며 이는 비용적인 문제로 인하여 시스템의 실제 구현이 불가능한 구조였다. 본 논문에서 제안하는 시스템은 디지털 신호 처리 알고리즘을 이용하여 최대 12개소의 전력 품질을 실시간 계측할 수 있는 시스템을 제안하며, 이를 토대로 한 시제품을 한국전기연구원의 공인시험 성적서를 통하여 그 성능을 평가 받았다. 성능 시험 결과 정밀 계측의 오차 범위 $\pm 0.3\%$ 의 우수한 성능임을 평가 받았다.

Key words : EMS, Harmonics, Power Factor, DSP, Multi-Lane

* Dept. of Electronic Engineering, Dong-A University

★ Corresponding author

E-mail : bongsoon@dau.ac.kr, Tel : +82-51-200-7703

※ Acknowledgment

This paper was supported by research funds from Dong-A University.

Manuscript received Aug. 27, 2018; revised Sep. 18, 2018; accepted Sep. 19, 2018

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

산업화 이후, 전력이 공급되기 시작한 이후로 전력의 사용량은 점점 더 많아지고 있으며 사용량이 증가하는 속도도 더욱 가속화 되고 있다. 대한민국은 에너지소비량 세계 10위, 에너지 수입량 세계 4위로 에너지 다소비 국가이다. 대한민국은 1979년 해외 기술을 수입하여 전력계통운영시스템을 도입하기 시작하여 현재는 한국형 전력계통운영시스템의 연구 개발을 완료하였으며, 현재는 한국형 전력계통운영시스템의 구축이 완료되었으며 차세대

한국형 전력계통운영시스템의 개발을 목표로 하고 있다[1].

기존의 전력관리는 전력 공급처인 국가의 전력계통운영시스템이 위주였으나, 최근 대정전과 같은 문제가 발생하면서 수요처에서도 전력관리에 대한 관심이 커지고 있다. 수요처에서 사용하던 기존 전력관리는 대표적으로 건물 에너지 관리 시스템인 BEMS(Building Energy Management System)이 있다. 최근에는 SBMS(Smart Building Managed Services)이 등장하였다[2, 3].

다양한 기술이 등장하고 있지만, 종래의 전력 관계 시스템의 한계점이 존재하는 부분이 있다. 그림 1은 종래의 전력 관계 시스템(EMS : Energy Monitoring System)에 대한 단선 결선도를 간략화 한 것이다. 기존의 EMS 장치는 1대의 장치로 1개소의 전력 품질을 측정할 수 있다. 이는 하나의 배전 전체에 대한 전력 품질을 측정할 수 있지만, 배전반에서 분배되는 개별 전로에 대하여 개별적인 전력 품질을 측정할 수 없는 구조이다. 개별 전로에 대하여 전력 품질을 측정하기 위해서는 개별 전로에 각각의 EMS 장치가 필요로 하며, 비용부담을 발생시킴으로써 인하여 개별 전로에 대한 전력 품질 관리 시스템 구축이 불가능하다.

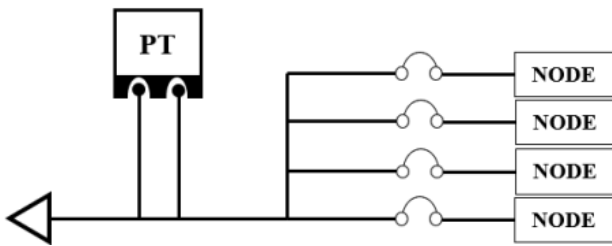


Fig. 1 Diagram of Conventional EMS system.
그림 1. 기존 EMS 시스템의 단선 결선도

본 논문에서는 분배된 개별 전로에 대하여 측정이 가능한 EMS 시스템을 제작하고 그 성능을 평가한다. 제작하는 시스템은 최대 12개소의 전력 품질을 실시간 측정을 목표로 한다. 제작품의 성능은 IEC 표준의 절연저항[4], 사용주파 내전압[5], 임펄스 내전압 시험[6]과 세부 10개 항목에 대한 계측 정밀도 시험을 통하여 그 성능을 평가한다. 본 논문의 II 장에서는 다전로 전력 계측을 위한 디지털 신호처리 프로세서 기반 전력 측정 시스템을 설명하고, III 장에서는 제작품의 성능 평가를 위하여

위탁 수행한 한국전기연구원의 시험 결과를 나타내었다. IV장에서는 결론을 맺는다.

II. 다전로 전력 계측을 위한 디지털 신호처리 프로세서 기반 전력 측정 시스템

기존 EMS의 한계점인 개별 전로에 대한 전력 품질 관리를 위하여, 본 논문에서는 1대의 장치로 분배된 개별 전로에 대한 전력 품질 관리가 가능한 시스템을 구축하고자 한다. 제안하는 시스템의 간략화 된 단선 결선도는 그림 2와 같다.

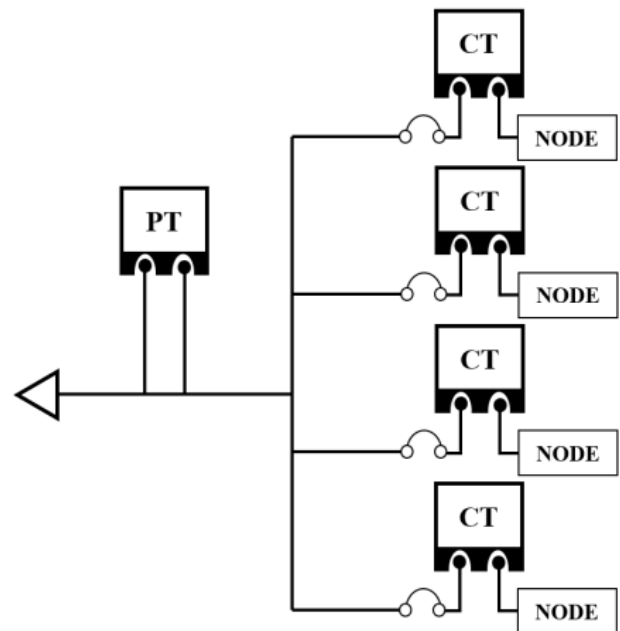


Fig. 2 Diagram of proposed EMS system.
그림 2. 제안하는 EMS 시스템의 단선 결선도

제안하는 EMS 시스템을 구축하기 위하여 시스템의 구성을 PT(Potential Transformer)와 CT(Current Transformer)로 구분한다. 배전에는 PT가 설치되며, 개별 전로에 대해서는 CT가 설치된다. PT는 전압을 입력받아 이와 관련된 전력 요소를 연산한다. CT는 전류를 입력으로 받으며 이와 관련된 전력 요소를 연산하여 PT로 전송한다. 제안하는 시스템은 1개의 EMS 시스템을 이용하여 최대 12개의 전로에 대한 전력 품질의 측정을 목표로 한다. 이는 EMS 시스템을 1대의 PT와 12대의 CT로 구성할 수 있다. 제안하는 시스템은 단선부터 3상 4선까지의 배전을 지원한다. 그림 3은 제안하는 시스템의 블록도를 나타낸다.

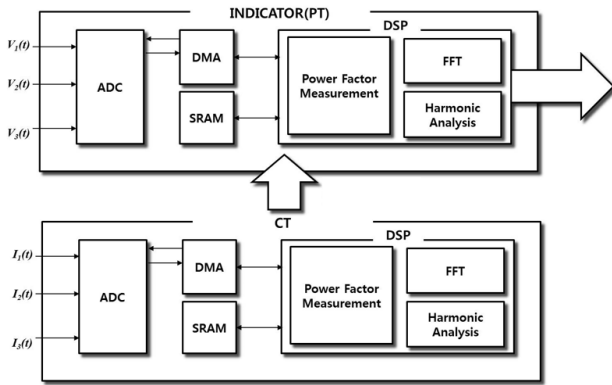


Fig. 3 Block Diagram of Proposed System.
그림 3. 제안하는 시스템의 블록도

본 논문에서는 제안하는 시스템은 16비트 디지털 신호 처리기(Digital Signal Processor : DSP)를 사용하여 구현하였다. 이 디지털 신호 처리기는 40MIPS의 연산 수행 능력을 가지고 있으며 128KB의 플래시 메모리와 16KB메모리를 포함하고 있다. 또한, ADC (Analog to Digital Convert)를 내장하고 있으며, 이를 시분할하여 최대 다중채널에 대한 ADC가 가능하다. 정밀 전력 계측을 위하여 필요로 한 전력 요소로는 최대전압, 최대전류, 제공근전압(Vrms), 제공근 전류(Irms), 순간 전압, 최대 수요 전류(Id), 과고율, 피상전력(S), 유효전력(P), 무효전력(Q), 역률(PF), 전압 고조파(Vthd), 전류 고조파(Ithd), 전압강하, 전압상승이 있다. 제공근 전력과 제공근 전류, 피상전력, 유효전력, 무효전력에 대해서는 Vector Apparent Power를 이용하였다. Vector Apparent Power를 이용하여 수식 (1)은 피상전력, 수식(2)는 유효전력, 수식 (3)은 무효전력, 수식 (4)는 역률, 수식 (5)는 전압 고조파, 수식 (6)은 전류 고조파, 수식 (7)은 최대수요전류를 연산할 수 있다[7].

$$S = V_{rms} \times I_{rms} \tag{1}$$

$$P = \frac{1}{T} \sum_0^{T-1} V[t]I[t] \tag{2}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \tag{3}$$

$$PF = \left| \frac{P}{S} \right| \tag{4}$$

$$V_{thd} = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{31} V_k^2}{V_1}} \times 100 \tag{5}$$

$$I_{thd} = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{31} I_k^2}{I_1}} \times 100 \tag{6}$$

$$I_{td} = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{31} I_k^2}{I_d}} \times 100 \tag{7}$$

전압과 전류에 대한 고조파 성분의 분석을 위해서는 고속 푸리에 변환이 필요로 하며, 제안하는 시스템에서는 60Hz로 입력되는 신호의 31 고조파의 측정을 위하여 60Hz의 31 고조파에 해당하는 1920Hz의 신호에 대해 샘플링을 수행하여야 하며, 나이퀴스트 이론에 의하여 3840Hz의 샘플링 주파수로 동작하도록 설계하였다. 메모리 사용량 최적화를 위하여 FFT에는 512개의 입력 샘플을 이용하여 연산하며, 더블 버퍼를 이용하여 데이터 충돌을 방지하였다. 그림 4는 PT의 제작품의 사진이다.



Fig. 4 Front of Fabricated PT Prototype.
그림 4. 제작된 PT 시제품 전면

III. 평가 및 평가 결과

본 논문에서 제안하는 시스템의 평가는 한국전기 연구원에 의뢰하여 시행되었다[7]. 평가 정격은 정격전압 500V, 정격전류 5A, 정격주파수 60Hz, 제어 전원 AC 110~230V, DC 110V이다. 시험 항목은 4가지로 수행하였으며, 각 시험 항목은 절연저항, 사용자 과 내전압, 임펄스 내전압, 계측 정밀도 시험이다. 계측 정밀도는 전압, 전류, 유효전력, 무효전력, 피상전력, 유효전력량, 주파수, 역률, 고조파 전압, 고조파 전류로 총 10개의 세부 시험 항목으로 수행되었다.

표 1은 절연저항, 사용자 과 내전압, 임펄스 내전압의 결과이다. 시험 방법은 전기회로와 대지 사이, 통신회로와 대지 사이, 전기회로 사이, 전기회로와 통신회로 사이를 측정하였다. 절연저항은 인가전압 DC 500V를 5초이상 인가하였을 때 측정되는 저항을 절연저항계로 측정하였다[4]. 측정 결과 9.999M

Ω 이상으로 적합 판정을 받았다. 상용주파 내전압 시험은 1분동안 60Hz의 주파수를 2kV를 인가하였을 때 이상여부를 측정하였으며[5], 모두 이상 없음 판정을 받았다. 임펄스 내전압의 경우는 정극성 및 부극성 전압을 1.2/50 μ s의 파형을 입력하였으며, 3kV의 전압을 인가하였을 때 이상 여부를 측정하였으며[6], 이상 없음 판정을 받았다.

Table 1. IEC Standard measurement test.

표 1. IEC 표준 측정 시험

Location	Insulation Resistance	Common Frequency	Surge Voltage
Between electrical circuit and ground	9.999M Ω	Clear	Clear
Between communication circuit and ground	9.999M Ω	Clear	Clear
Inter electrical circuits	9.999M Ω	Clear	Clear
Between electrical circuit and communication circuit	9.999M Ω	Clear	Clear

표 2는 정밀 계측 시험의 결과이다. 정밀 계측 시험은 10개의 세부 항목으로 수행되었으며, 정밀도는 최대 입력 대비 계측 값의 허용오차가 $\pm 0.3\%$ 이내를 목표로 한다. 표는 좌측부터 측정 인자(Factor), 허용범위(Tolerance), A상(Phase A), B상(Phase B), C상(Phase C)에 대한 각각의 결과를 보여준다. 전압 계측 정밀도는 기본과 전압 50V, 220V, 500V를 인가하였으며, 전류 계측 정밀도는 기본과 전류 0.05A, 2.5A, 5A를 인가하여 계측하였다. 유효전력, 무효전력, 피상전력은 선간전압 380V를 인가하고 전류를 1A, 2.5A, 5A 인가하여 계측하였다. 유효전력량은 선간 전압 380V, 역률 1인 조건의 전류 2.5A를 인가하고 1시간, 2시간, 3시간 경과 시 유효 전력량의 계측하였다. 주파수 계측 정밀도는 전압 220V를 인가하고 55Hz, 60Hz, 65Hz의 주파수를 입력하여 주파수를 계측하였다. 역률 정밀도는 전압 220V, 전류 1A를 역률 -1.0, 0, 1.0의 조건으로 인가하여 계측하였다. 고조파 전압은 기본과 전압 220V에 대한 3, 5, 7조파를 각각 0%, 50%, 100%인가하여 계측하였으며, 고조파 전류 계측 정밀도 시험은 기본과 전류 5A에 3, 5, 7조파를 0%, 50%, 100%인가하여 계측하였다.

Table 2. Measurement Accuracy.

표 2. 정밀 계측 결과

Factor	Tolerance	Phase A	Phase B	Phase C
Voltage [V]	48.5~51.5	49.94	49.94	49.98
	218.5~221.5	219.55	219.40	219.53
	498.5~501.5	499.01	499.00	498.84
Current [A]	0.035~0.065	0.051	0.052	0.051
	2.485~2.515	2.499	2.501	2.503
	4.985~5.015	5.001	5.001	5.003
Active Power [W]	216.1~222.6	219.24	218.79	218.89
	545.1~551.7	547.22	547.45	546.80
	1093.6~1100.1	1095	1094	1098
Reactive Power [var]	216.10~222.68	219.09	219	218.73
	545.19~551.77	546.67	546.85	546.77
	1093.6~1100.1	1098	1094	1098
Apparent Power [W]	216.10~222.68	219.06	218.83	218.75
	545.19~551.77	546.72	546.92	546.72
	1093.1~1100.1	1095	1094	1098
Effective Power [Wh]	1640.4~1650.3	1.648.1		
	3281.0~3300.7	3295.2		
	4921.5~4951.1	4939.5		
Frequency [Hz]	54.835~55.165	55.03	55.02	55.02
	59.820~60.180	60	60.01	60.01
	64.805~65.195	65.02	65	65.01
Power Factor	-1.000~-0.997	-0.998	-0.999	-0.999
	-0.003~0.003	0.001	0.001	0
	0.997~1.000	0.999	1	1
Harmonics Voltage [V]	0.00~0.66	0.02	0.03	0.02
	109.34~110.66	110.01	110.02	110.02
	219.34~220.66	220.05	220.06	220.03
Harmonics Current [A]	0.000~0.015	0.01	0.009	0.008
	2.485~2.515	2.498	2.499	2.498
	4.985~5.015	4.999	4.998	4.997

IV. 결론

본 논문에서는 배전반에서 개별 전로에 대한 전력 품질을 측정할 수 있는 시스템을 제작하고 한국 전기연구원에 위탁하여 제작된 시스템의 성능을 평가하였다. 제안하는 시스템은 기존 EMS 시스템을 PT와 CT로 구분하여 1대의 PT에 최대 12개의

CT를 연결 할 수 있는 구성으로 최대 12개의 개별 전로에 대한 전력 요소를 실시간으로 측정 할 수 있으며, 한국전기연구원에 위탁하여 IEC 표준 성능 테스트와 세부 전력 요소 정밀도에 대한 성능 평가를 수행하였다. 그 결과로 공인 시험결과 계측 정밀도 시험결과 오차 $\pm 0.3\%$ 의 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

References

- [1] J. Lee, "Current Status and Expected Effect of EMS localization," *Journal of Korea Electric Association*, vol.457, pp.26-29, Jan. 2015.
- [2] D. Minoli, K. Sohraby, and B. Occhiogrosso, "IoT Considerations, Requirements, and Architectures for Smart Buildings—Energy Optimization and Next-Generation Building Management Systems," *IEEE Internet of Things Journal*, vol.4, no.1, pp. 269-283, Feb. 2017.
- [3] F. Farmani et al, "A conceptual model of a smart energy management system for a residential building equipped with CCHP system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol.95, pp.523-536, Feb. 2018.
- [4] IEC Standard, IEC60255: Measuring relays and protection equipment, part 27: product safety requirements 10.6.4.4, 2013.
- [5] IEC Standard, IEC60255: Measuring relays and protection equipment, part 27: product safety requirements 10.6.4.3, 2013.
- [6] IEC Standard, IEC60255: Measuring relays and protection equipment, part 27: product safety requirements 10.6.4.2, 2013.
- [7] G.J. Kim and Bongsoon Kang, "System Design for Real-Time Measuring of Power Quality and Harmonics Distortion using Digital Signal Processor," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol.20, no.7, pp. 1283-1289, Jul. 2016.
- [8] Korea Electrotechnology Research Institute Certification No.:2017-TRD16S01672

BIOGRAPHY

Geun-Jun Kim (Member)



2013 : BS degree in Electronic Engineering, Dong-A University.
2013~ : Ph.D Candidate in Electronic Engineering, Dong-A University.

Bongsoon Kang (Member)



1985 : BS degree in Electronic Engineering, Yonsei University.
1987 : MS degree in Electrical Engineering, University of Pennsylvania.
1990 : PhD degree in Electrical Engineering, Drexel University.

1989~1999 : Senior Staff Researcher, Samsung Electronics.

1999~ : Prof. of Dept. of Electronic Engineering, Dong-A University.