

AMI 기반 전력 모니터링을 위한 스마트 플러그 연구

배선호*, 강병관*, 김승탁*, 이현구*, 박정욱*
연세대학교*

A Study on Smart-Plug for Electric Power Monitoring System Based on AMI

Sun-Ho Bae*, Byung-Kwan Kang*, Seung-Tak Kim*, Hyun-Koo Lee*, Jung-Wook Park*
Yonsei University*

Abstract - AMI (Advanced Metering Infrastructure)는 스마트 그리드에서 핵심 시스템이며, 기술 자체가 어렵지 않기 때문에 실현 가능성이 가장 높은 분야라고 할 수 있다. 소비자와 공급자 사이에서 단순한 전기 소비 측정에 그치는 것이 아니라 측정된 정보의 저장과 교환이 실시간으로 이루어지는 스마트 그리드 환경에서 원격으로 실시간 전력 계측기인 스마트 미터의 필요성이 증대되고 있다. 이에 따라 본 논문에서는 스마트 미터를 기존 플러그의 디자인으로 제작하여 어느 기기에도 적용이 가능한 형태인 스마트 플러그의 연구와 성능을 검토한다.

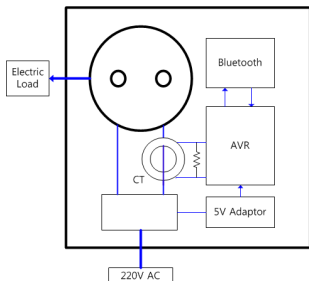
1. 서 론

지능형 전력량계인 스마트 미터는 AMI를 구현을 위한 핵심 부품 중 하나로 사용한 전력량을 일정한 시간간격으로 측정하여 다양한 통신 방법을 이용하여 상위의 다른 기기로 전달하는 기능을 가지고 있다. 스마트 미터는 현재 외국의 많은 업체에서 개발, 판매되고 있으며, 국내에서도 지식경제부의 주도하에 전자식 전력량계의 보급을 준비하고 있다. [1] 본 논문에서는 스마트 미터가 단순한 원격 검침기에서 벗어나 다수의 스마트 미터가 무선으로 연결되어 실시간 전력 사용 정보와 전력 품질 상태를 PC를 통하여 사용자에게 알려주고, 전력 사용 데이터를 PC에 저장되어 원하는 시간대의 사용 정보를 이용하여 다양한 분야에 활용될 수 있도록 하는 스마트 미터를 연구하였다.

2. 스마트 플러그 제작

2.1 스마트 플러그의 구조

<그림 1>은 본 논문에서 제안하는 스마트 플러그의 구조를 나타낸다. 스마트 플러그는 일반적인 전기 플러그와 같은 디자인을 가지기 때문에 사용 중인 전기기기에 추가적인 작업 없이도 직접 설치하여 사용할 수 있는 장점이 있다. 핵심 부품 소자들인 Current Transformer, AVR, 블루투스 모듈의 크기가 작기 때문에 일반적인 전기 플러그와 같은 모양으로 설계가 가능하다. 본 스마트 플러그의 작동 순서는 먼저 Current Transformer와 AVR을 이용하여 전기기기로 흘러들어가는 전류를 측정한다. 여기서 Current Transformer는 1차측의 전류를 일정한 비율로 낮춰 2차측의 저항에 흘려보내게 되고, AVR은 저항에 걸리는 전압을 측정함으로써 이미 알고 있는 Current Transformer의 비율과 저항 값을 이용하여 1차측의 전류를 계산할 수 있다.



<그림 1> 제안된 스마트 플러그 구조도

Current Transformer를 이용하게 되면 실제 전기기기로 흐르는 큰 전류를 ADC를 수행할 AVR에서 측정 가능한 범위로 변환 할 수 있으며, 또한 1차와 2차측이 전기적으로 분리되어 있기 때문에 스마트 플러그의 결함이 발생하더라도 전기기기에 영향을 주지 않는 장점이 있다.

AVR은 본 스마트 플러그의 핵심이라 할 수 있는 MCU (Micro Controller Unit)이다. AVR은 소비 전력이 적으면서도 대부분의 명령을

단일 사이클에 실행 할 수 있으며 A/D Conversion, 시리얼 통신이 가능하다. AVR에 포함된 10bit A/D 컨버터는 음전압도 측정할 차동 입력 모드를 가지고 있어서 -5V에서 5V까지의 아날로그 신호의 입력이 가능하기 때문에 AC 전류를 별다른 변환 과정 없이도 측정이 가능하다.

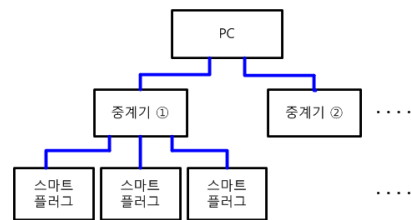
AVR에서 측정된 데이터는 블루투스 모듈을 통하여 상위의 시스템으로 무선 전송한다. 스마트 플러그를 가전내의 기기에 설치 할 때 집안 여러 곳에 흩어져 있는 가전 기기들에 연결하기 위해서는 무선 통신을 이용하는 것이 별도의 유선 처리 작업을 보다 쉽고 간단하게 해결 할 수 있게 된다. 이렇게 무선으로 전송받은 데이터는 PC에서 필요시 선택적으로 저장이 가능하도록 시스템을 구성하였다.

2.2 안정적인 통신 상태 유지와 샘플링 속도 향상을 위한 전략 수립

본 논문에서는 전류 소모량뿐만 아니라 전력 품질 감시까지 포함한 스마트 플러그를 목표로 하였다. 일반적인 전력 계측만을 위해서는 1~2초당 한, 두 번의 데이터만 전송하여도 충분한 데이터가 되겠지만, 전력 품질 감시를 위한 시스템에서는 훨씬 더 높은 샘플링 주파수의 데이터가 필요하다. 여러 가지 전력 품질 관련 문제 중에서 고조파의 검출을 위해서는 주파수의 분석을 필요로 하기 때문에 원 신호인 60Hz의 sin 파형을 샘플링 왜곡 없이 입력 받을 수 있는 높은 샘플링 주파수를 필요로 한다. 하지만 높은 샘플링 주파수는 더 많은 양의 데이터 전송을 필요로 한다. 따라서 일반적인 블루투스나 지그비의 1:N 방식으로는 통신 속도가 데이터의 양을 감당하지 못하기 때문에 사용이 불가능 하다.

또한 일반 가정 내에 스마트 플러그를 설치할 경우 가전기기가 가정 내 넓은 장소에 흩어져 있으며 벽을 비롯한 많은 장애물들이 존재한다. 하지만 블루투스나 지그비의 통신체계로는 안정적인 무선 통신 연결 상태의 신뢰성을 보장하지 못하기 때문에 이를 보완 할 수 있는 방법이 필요하다.

위의 두 가지 문제를 해결하기 위한 방법으로 추가적인 AVR과 블루투스 모듈의 사용을 통한 중계기 설치를 고안하였다. <그림 2>는 PC와 중계기, 스마트 플러그 사이의 연결을 나타낸다. 중계기는 스마트 플러그의 AVR 세 대와 PC에 연결되어서, AVR에서 수신된 데이터를 받아 PC로 전송하고, 또한 PC에서 들어오는 명령 데이터도 특정한 AVR로 보낼 수 있는 양방향 통신이 가능한 중계기이다. 모든 연결은 블루투스를 이용한 1:1 무선 통신을 이용하였기 때문에 많은 양의 데이터 전송이 가능한 통신 속도를 낼 수 있다. 이러한 방식으로 중계기를 여러 대 이용함으로써 많은 개수의 스마트 플러그의 연결이 가능해지며, 장애물을 피해 중계기를 설치함으로써 통신 거리의 향상 또한 기대 할 수 있다.



<그림 2> 중계기 연결 개념도

2.3 전력 품질 측정 알고리즘

전력 품질의 종류에는 순시전압정전, 순시전압강하, 순시전압상승 그리고 고조파 문제가 있다. 이 중에서 고조파 문제를 제외하면 전압의 측정을 통해 RMS값의 비교로 비교적 손쉽게 품질 감시가 가능하다. 하지만 고조파 문제의 경우에는 주파수 영역을 분석하는 푸리에 변환의 연산이 필요하다. 이산 푸리에 변환은 연산량이 많기 때문에, 연산량을 줄인 식(1)의 고속 푸리에 변환을 사용하여 시스템의 속도가 저하되지 않는 선에서 고조파를 검출 하였다. 전체 고조파 왜곡률의 계산은 식(2)과

같이 1고조파에 대한 나머지 고조파 성분의 합에 대한 비율로 결정된다.

$$FFT: X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} kn} \quad (1)$$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} X[n]^2}}{X_1} \quad (2)$$

하지만 연결된 모든 스마트 플러그의 품질 감시를 PC에서 실시간으로 수행하기에는 아무리 연산량이 개선된 고속 푸리에 변환을 사용하더라도 전체 시스템의 속도가 저하될 문제가 있다. 따라서 품질 감시는 각 스마트 플러그에 부착된 AVR에서 개별적으로 수행되는 것이 바람직하다. 하지만 AVR의 연산속도로는 실시간으로 고속 푸리에 변환식을 수행하는 것이 불가능하기 때문에 더욱 단순화 된 연산이 필요하다. 식(3)의 Parseval's relation 을 이용하면 식(2)의 전체 고조파 왜곡률의 계산은 모든 고조파의 값을 구할 필요 없이 1고조파의 성분만을 포함한 식(4)로 변환이 가능하다. [2]

$$Parseval's relation : P_x = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} g(m)^2 = \sum_{k=0}^{N-1} G_k^2 \quad (3)$$

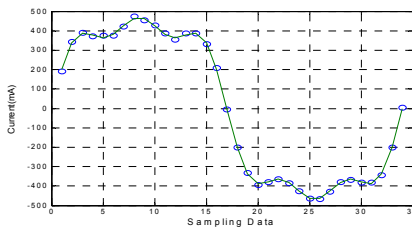
$$THD = \frac{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} g[m]^2 - X_1^2}}{X_1} \quad (4)$$

하지만 고속 푸리에 변환 없이 왜곡된 파형에서 1고조파의 성분을 정확히 예측 할 수가 없기 때문에 1고조파의 성분은 입력된 파형의 최대값으로 정한다. 하지만 파형의 최대값은 1고조파의 성분 값과 일치하지 않아서 AVR에서의 전력 품질 계산은 어느 정도의 오차를 감수하여야한다. 대신 AVR에서 계산된 전체 고조파 왜곡률이 일정 이상 큰 값이 검출될 시에 PC로 이상 신호를 발송하여, PC에서 이상 신호를 보낸 측에 데이터만 고속 푸리에 변환식을 통하여 정확한 고조파 왜곡률을 구하여 전력 품질 이상 여부를 최종적으로 판단하도록 구성한다.

3. Simulation

3.1 전력품질 감시를 위한 전체 고조파 왜곡률 측정 Simulation

<그림 3>은 3, 5고조파가 포함되어 전류 파형에 이상이 생긴 것을 가정하여 스마트 플러그에 입력한 파형과 샘플링 결과이다. 각 점은 AVR에서 A/D 컨버터를 통하여 계속되어 PC로 전송된 데이터를 그래프로 표현하였다. 1주기 32샘플링으로 3, 5고조파가 포함된 파형을 샘플링 왜곡 없이 원신호의 파형을 그대로 담아 낼 수 있음을 확인 할 수 있다.



<그림 3> 고조파가 포함된 파형의 측정

<표 1> 신호에 대한 각 위치별 전체 고조파 왜곡률 연산 결과

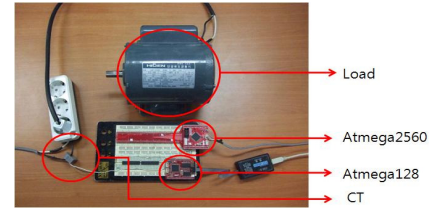
연산 위치	원 신호	AVR	PC
THD	24.41%	38.73%	24.46%

<표 1>은 입력신호에 대한 전체 고조파 왜곡률을 각각의 위치에서 계산되어 출력된 결과이다. AVR에 입력되는 원 신호는 입력 파형의 수식을 바탕으로 계산된 값이다. AVR에서 샘플링 데이터와 간략화 된 식(5)로 구한 결과는 38.73%로 오차를 포함하고 있으며, AVR에서 보낸 이상신호를 받아 PC에서 연산된 결과는 24.46%로 최종적으로 원래의 값과 차이가 없는 계산 결과를 얻을 수 있는 것을 확인하였다.

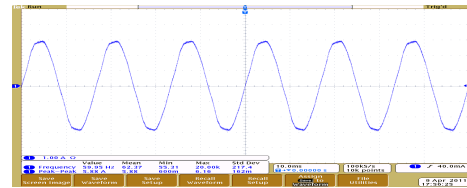
3.2 소규모 모터를 이용한 실제 전류 측정

위에서 제시한 개념을 적용하여 AVR과 Current Transformer를 이용하여 스마트 플러그를 제작하였다. 스마트 플러그로써의 성능을 확인해 보기 위해 진행된 테스트로 제작은 최종 목표인 플러그의 형태로 하지

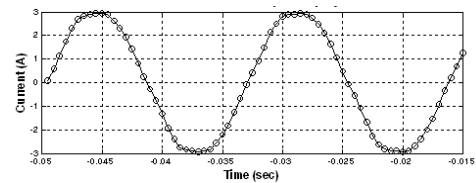
않고 <그림 4>에서 알 수 있듯이 Bread Board를 이용하여 소자들을 우선으로 연결하였다. 사용된 AVR의 종류는 증계기로 Atmega2560 모듈을, 스마트 플러그용으로 Atmega128 모듈을 사용하였으며, 부하는 소규모 전동기를 연결하여 테스트를 수행하였다. Current Transformer의 비율은 964.28:1이며, 샘플링 주파수는 60Hz의 AC 전류를 1주기 당 32샘플 이상을 얻을 수 있는 2000Hz로 구현하였다.



<그림 4> 스마트 플러그 제작을 위한 성능 검증



<그림 5> 오실로스코프를 이용한 실제 전류 측정



<그림 6> PC에 저장된 전류 측정 데이터

<그림 5>는 오실로스코프를 이용하여 실제 모터에 흐르는 전류를 측정 한 그래프이고, <그림 6>은 각 AVR을 통하여 PC에 최종적으로 저장되는 데이터이다. 두 개의 파형이 똑같이 그려지는 모습을 확인 할 수 있으며 실제 측정값 역시 오실로스코프 상의 절두치는 2.94V로 측정된 데이터의 2.90V와 유사한 값을 가지는 것을 확인하였다. 이렇게 1분간 측정하였을 때 120,000번의 데이터를 획득하여 2000Hz의 샘플링 주파수 역시 정확히 지켜지는 스마트 플러그의 성능을 확인 하였다.

4. 결 론

정확하고 다양한 사용 전력에 대한 정보를 제공하기 위해서 기존에 활용되는 스마트 플러그보다 훨씬 높은 샘플링 주파수로 데이터를 측정하고 또한 저장할 수 있는 장치가 필요하다.

본 논문에서는 여러 대의 스마트 플러그가 동시에 연결되어 2000Hz의 높은 샘플링 주파수로 실시간 전류 사용량을 측정한다. 측정된 데이터는 블루투스를 이용한 무선통신으로 PC에 저장되어 실시간 전력 사용 모니터링과 전력품질 감시가 가능한 스마트 플러그의 개발하고 성능을 검증하였으며, 이를 활용하여 전력소모량 모니터링과 전력 품질 감시에 적용하였다.

[감사의 글]

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20104010100590-11-1-000)

[참 고 문 헌]

- [1] Hahn Tram, "Technical and Operation Considerations in Using Smart Metering for Outage Management", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp. 1-3, 2008.
- [2] Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky, and S. Hamid Nawab, "Signals & Systems," 2nd ed., Upper Saddle River, New Jersey; Prentice Hall, 1996. ISBN: 978-0138147570