

전력선 주파수 모니터링을 위한 Intelligent Electronic Device (IED) 플랫폼

논문
58-5-27

A Power-line Frequency Monitoring Intelligent Electronic Device (IED) Platform

전 현 진* · 이 돈 진** · 전 준 길** · 장 태 규†
(Hyeon-Jin Jeon · Don-Jin Yi · Jun-Gil Jeon · Tae-Gyu Chang)

Abstract - This paper presents an intelligent electronic device (IED) platform which is based on a new frequency estimation algorithm. The IED platform features not only the accurate estimation of frequency but also the fast network-based transmission of fault data and waveforms. The simulation results show that the proposed frequency estimation algorithm improves convergence speed, and has lower frequency estimation error compared with those of conventional algorithms. The network-based IED is designed to ensure transmission latency being less than 1.0 % of sampling interval.

Key Words : Flexible IED, Frequency Estimation, Power Line Monitoring

1. 서 론

정밀하고 빠른 주파수 추정은 전력선 보호계전을 위해 가장 중요한 일 중 하나이다. 전력변수에는 전력선의 주파수, rms, phase, PHD 등이 있는데 이들의 측정을 위해서는 정밀한 주파수 추정이 요구되기 때문이다. 보호계전 시스템은 전력변수를 분석하여 예기치 못한 오류를 감지하고 미리 차단함으로써 피해를 최소화 하는 것에 목적을 두고 있다. 하지만 지금까지의 관련 연구와 또한 실제로 적용되는 전력선 변수들에 대한 계측은 대부분의 경우 독립적 측정 기능을 확보한다고 할 수 있다. 또한 높은 복잡도의 알고리즘 적용하는 것은 실시간 계측을 위해 고성능 시스템을 요구한다.

최근에 data/control을 외부 source와 송수신 할 수 있는 processor와 결합된 형태의 유연 IED의 출현으로 다양한 형태의 알고리즘 적용이 가능하게 되고 알고리즘 적용 범위가 넓어져서 전체 시스템의 정밀도와 신뢰성 등의 큰 향상을 가져오게 되었다 [1]. 하지만 대부분의 경우 전력변수의 단순한 모니터링 목적의 IED의 사용, 고정된 모니터링 알고리즘 적용, 고성능 시스템으로 IED를 구현하는 등의 한계가 존재하는 것이 사실이다. 따라서 유연 IED 플랫폼 H/W는 기존의 ASIC과 같은 dedicated H/W 설계와는 달리 다양한 보호계전 알고리즘들의 설정 및 조합이 손쉽게 가능할 수 있도록 알고리즘의 재사용성 및 시스템 reconfigurability가 충분히 확보할 수 있도록 설계되어야 한다.

본 논문에서는 정밀하면서 실시간으로 주파수 추정을 하기 위해 낮은 복잡도를 가지는 새로운 주파수 추정 알고리즘을 제시하고, 또한 이를 이용하여 주파수 모니터링에 기반

한 새로운 유연 IED 플랫폼 구조를 제시하고자 한다. 즉, 분산환경에 있는 각 agent의 전력변수를 공유하고 오류 발생시 미리 차단하기 용이한 유연 IED를 위한 S/W 구조를 설계하였고, 이의 수용에 적합한 형태의 H/W 플랫폼 구조를 제시하였다. 이는 전력계통 시스템 특성상 멀리 떨어져 있는 각 agent의 시스템 reconfigurability를 확보할 수 있게 하고, local system으로서의 H/W 제약사항들이 존재하는데 기존의 고성능 시스템으로 IED를 구현하는 대신 DSP와 network processor (NP)를 이용하는 효율적인 embedded system 구조를 가지고 있다.

2. 본 론

2.1 Maximum-likelihood method (MLM) 기반의 주파수 추정 알고리즘

전력계통에서 주파수를 정밀하면서도 신속하게 측정하는 것은 보호계전 목적으로써 매우 중요하다. 본 절에서 빠른 수렴속도와 정밀성을 가지는 MLM에 기반하는 새로운 주파수 추정 알고리즘을 도출하였다.

MLM은 고해상도의 주파수 분석 기술로 알려져 있는데, autoregressive spectral estimator와 classical spectral estimator의 중간정도의 해상도를 가지고 있다. MLM은 다음과 같이 정의된다 [2].

$$P_{MLM}(\omega) = \frac{T}{\mathbf{e}^H(\omega)\mathbf{R}_p^{-1}\mathbf{e}(\omega)} \quad (1)$$

여기에서 T 는 샘플링 간격, \mathbf{R}_p^{-1} 은 추정된 $P \times P$ 차원인 상관행렬 \mathbf{R}_p 의 역행렬, $\mathbf{e}(\omega)$ 는 복소 정현 벡터이고 다음과 같다.

$$\mathbf{e}(\omega) = [1, e^{j\omega}, \dots, e^{-j(P-1)\omega}]^T \quad (2)$$

$P_{MLM}(\omega)$ 는 신호의 주파수의 위치에서 peak를 형성하므로 식 (1)의 분모는 신호 주파수 위치에서 가장 작은 값을 가지는 오목한 형태를 형성한다. 따라서 기술품을 기반으로 하는 반복적인 방법을 이용해 신호의 주파수를 추정할 수 있다.

* 정 회 원 : 중앙대 공대 전자전기공학부 박사과정
** 준 회 원 : 중앙대 공대 전자전기공학부 석사과정
† 교신저자, 정회원 : 중앙대 공대 전자전기공학부 교수 · 공학
E-mail : tgchang@cau.ac.kr
접수일자 : 2009년 3월 12일
최종완료 : 2009년 3월 23일

다음은 i 번째 반복일 때의 식(1)의 분모를 나타낸다.

$$J(i) = \sum_{p=1}^P r_{pp}^{-1} + \sum_{m=1}^{P-1} \left\{ e^{-jm\omega_{i-1}} \sum_{p=m+1}^P r_{p-m,k}^{-1} + e^{jm\omega_{i-1}} \sum_{p=m+1}^P (r_{p-m,k}^{-1})^* \right\} \quad (3)$$

ω_{i-1} 는 $i-1$ 번째 반복일 때 추정된 주파수 값이고, $r_{m,n}^{-1}$ 은 R_p^{-1} 의 (m,n) 번째 원소를 나타낸다. 주파수 ω_{i-1} 에서의 기울기를 구하면 다음과 같다.

$$\nabla_{\omega_{i-1}} J(i) = -2 \sum_{m=1}^{P-1} m \left\{ \begin{array}{l} \sin(m\omega_{i-1}) \sum_{p=m+1}^P \text{Re} [r_{p-m,p}^{-1}] \\ -\cos(m\omega_{i-1}) \sum_{p=m+1}^P \text{Im} [r_{p-m,p}^{-1}] \end{array} \right\} \quad (4)$$

식(4)를 이용해서 주파수를 추정할 수 있는데, 우선 전력선 신호가 입력될 때마다 R_p 와 R_p^{-1} 가 갱신된다. R_p 를 추정하기 위해서는 covariance method [3]를 통해 $P \times M$ 데이터 행렬을 이용할 수 있다. 다음 단계로 K 번의 반복을 통해 주파수 추정이 이뤄진다. 반복과정은 다음과 같이 표현된다.

$$\omega_i = \omega_{i-1} - \mu(i) \nabla_{\omega_{i-1}} J(i), \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (5)$$

$\mu(i)$ 는 가변 step size이고 다음과 같다.

$$\mu(i) = \tilde{\mu} \sum_{m=1}^P \sum_{n=1}^P \left\{ \begin{array}{l} |\text{Re} [r_{m,n} - e_m(\omega_{i-1})e_n(\omega_{i-1})^*]| \\ + |\text{Im} [r_{m,n} - e_m(\omega_{i-1})e_n(\omega_{i-1})^*]| \end{array} \right\} \quad (6)$$

$r_{m,n}$ 은 R_p 의 (m,n) 번째 원소, e_m 은 e 의 m 번째 원소, $\tilde{\mu}$ 는 양의 실수인 스케일링 계수이다. 식(6)은 ω_{i-1} 가 실제 주파수에 가까워지면 $\mu(i)$ 는 작아져야 하고 신호대잡음비 (SNR)가 작아지면 $\mu(i)$ 가 커져야 하는 원리를 바탕으로 도출되었다.

제한한 주파수 추정 알고리즘은 역상관행렬을 계산해야므로 $O(P^2)$ 의 복잡도를 갖지만 모의실험 결과 P 와 K 를 각각 4와 2로 설정해도 충분한 성능을 보여 실제로는 낮은 복잡도를 갖는다고 할 수 있다.

2.2 전력선 주파수 모니터링을 위한 유연 IED 플랫폼

구조

전력계통의 각 agent의 전력변수를 통합적으로 수집하고 reconfigurability를 확보하기 위해 전력선 주파수 모니터링을 위한 유연 IED 플랫폼 구조를 도출하였고, 이를 그림 1과 2에 나타내었다.

그림 1은 전력선 주파수 모니터링을 위한 유연 IED S/W 순서도를 나타낸다. 유연 IED 플랫폼이 초기화되면 샘플링된 전력선의 전압 및 전류 신호를 링버퍼에 지속적으로 버퍼링을 수행하는데 이는 오류 발생시 오류 발생시점 전후 일정량의 입력신호를 중앙서버로 전송하기 위함이다. 오류 발생시 각 agent에서 오류시점 부근의 데이터를 전송함으로써 중앙 서버에서 보다 정확한 오류원인검출을 용이하게 하고 agent들을 보다 효율적인 통합제어를 할 수 있다는 장점이 있다. 링버퍼에 채워진 데이터는 2.1절에서 제안한 알고리즘을 통해 주파수 추정하는데 이용되고, 오류가 발생하면 플랫폼은 링버퍼를 제어해서 이를 중앙 서버로 전송한 후 sleep 상태로 들어가게 된다. 오류상황이 종료되면 중앙서버에서 각 agent를 초기화시키게 된다.

제한된 주파수 추정 알고리즘을 주파수 모니터링 목적으로 IED 플랫폼에 적용하기 위해서는 적절한 변수 설정이 중요하다. 데이터 행렬의 column 수 M 에 따라 수렴속도와 정밀도가

trade-off 관계에 있기 때문에 M 을 기본주파수의 half cycle 정도로 설정하는 것이 합리적이다. 또한, 반복 횟수 K 는 수렴속도와 연관돼 있지만 가변 step size를 적용하여 적은 반복으로도 수렴속도가 보장되므로 K 를 2로 설정할 수 있다. 상관행렬의 차원 P 는 실제로는 고조파 수보다 커야하지만 고조파의 크기가 대부분 기본 주파수에 비해 상당히 작기 때문에 복잡도를 고려하여 4 정도로 설정하는 것이 합리적이다.

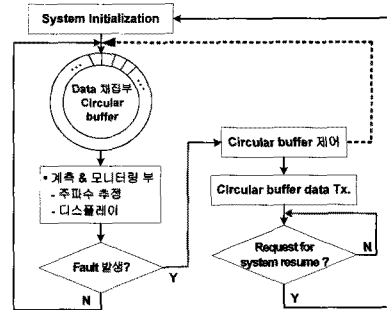


그림 1 전력선 주파수 모니터링을 위한 유연 IED S/W 순서도
Fig. 1 Flow diagram of the flexible IED platform S/W for power line frequency monitoring

유연 IED 플랫폼은 알고리즘의 재사용성 및 시스템 reconfigurability가 충분히 확보하여야 하고 짧은 시간에 링버퍼의 데이터를 전송할 수 있어야 하는데 이를 위해 도출한 플랫폼 H/W 구조를 그림 2에 나타내었다. 제한한 H/W는 크게 TCP/IP 통신을 할 수 있는 NP와 주파수 모니터링 알고리즘을 탑재할 수 있는 DSP로 이뤄져 있고 peripheral component interconnect (PCI) bus를 통해 연결돼 있다. 이는 서버로부터 모니터링 프로그램을 전송받아 DSP 상에서 실행하는 방식으로 reconfigurability 기능을 제공한다.

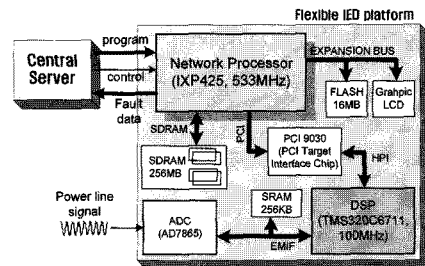


그림 2 유연 IED 플랫폼 H/W 구조
Fig. 2 H/W architecture of the flexible IED platform

전력선에 오류가 감지됐을 때 짧은 시간에 오류 시점 전후 데이터를 서버로 전송하는 것은 IED가 갖추어야 하는 중요한 기능중의 하나이다. 제시한 IED 플랫폼은 전송 latency를 감안하더라도 샘플당 전송 시간이 샘플링 간격 $1/f_s$ 의 1% 이내가 되도록 설계하여 실시간 계통보호 적용성을 높이도록 하였다. 링버퍼의 데이터를 서버로 전송할 때 주된 latency는 PCI 전송과 ethernet 전송에 기인한다. 전송만을 고려했을 때 33 MHz의 32 bit PCI bus와 100 Mbps의 ethernet을 가정하면 약 100 Mbps의 전송률을 가진다. 따라서 f_s 가 1.6 kHz이고 샘플링된 신호가 4 byte로 표현된다면 전송 latency는 샘플당 $1/f_s$ 의 0.05%정도이다. 하지만 플랫폼

품의 O/S 및 S/W 지연과 network congestion 등을 감안하면 제한한 H/W는 평균적으로 샘플당 $1/f_s$ 의 1% 정도 시간 이내로 전송할 수 있는 구조이다.

2.3 주파수 모니터링 IED 성능실험

제시한 주파수 추정 알고리즘에 대한 모의실험을 수행하였고, 또한 제시한 유연 IED 플랫폼 구조를 실제 구현한 후 주파수 모니터링 S/W를 탑재하여 타당성을 검증하였다.

기존의 주파수 추정 알고리즘인 extended complex Kalman filter (ECKF) 알고리즘 [4]과 demodulation 알고리즘 [5]과의 비교를 통해 본 논문에서 제안한 주파수 추정 알고리즘의 성능을 분석하였다. 제안한 알고리즘의 $\tilde{\mu}$ 는 3×10^{-4} 로 설정했다. ECKF 알고리즘은 비교를 위해 제안된 알고리즘과 tracking behavior가 동일하도록 변수를 설정하였고 R_p 와 동일한 차원으로 state-space model을 정의하였다. demodulation 알고리즘은 고조파의 영향을 억제하기 위해 필터링 과정을 삽입하였다 [5].

입력신호에 SNR이 60dB, 80dB, 100dB인 백색잡음과 고조파 성분을 추가하였다. 고조파 성분은 홀수 고조파를 15차까지 삽입하고, 각각의 크기는 1, 0.05, 0.02, 0.5^7 , 0.5^9 , 0.5^{11} , 0.5^{13} , 0.5^{15} 로 설정하였다. f_s 는 1.6 kHz로 하였다.

SNR이 80 dB일 때의 결과를 그림 3(a)에 나타내었고, 그림 3(b)는 그림 3(a)의 원부분을 확대한 것이다. 제안한 알고리즘은 다른 두 알고리즘에 비해 tracking behavior가 유사하거나 빠르고 임계감쇠 방식으로 수렴하여 보다 빠른 수렴을 보인다. 정상상태에서 주파수 추정오차를 비교해 본 결과를 표 1에 나타내었고 80 dB 이상의 높은 SNR에서 제안된 알고리즘이 더 정밀한 추정을 한다는 것을 보인다.

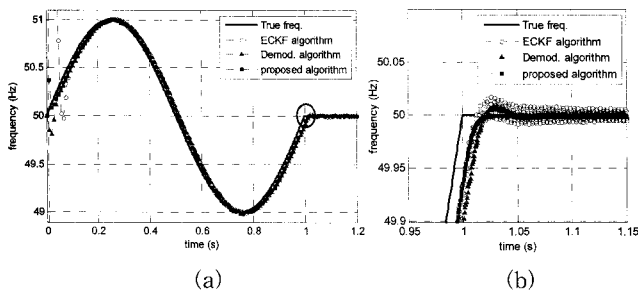


그림 3 (a) 주파수추정결과(SNR=80dB) (b) (a)의 원부분 확대
Fig. 3 (a) Frequency estimation results (SNR=80dB) (b) Magnified version of the circled region of (a)

표 1 주파수 추정 오차

Table 1 Frequency estimation errors

SNR	Proposed algorithm	ECKF algorithm	Demodulation algorithm
100 dB	8.1911×10^{-4}	1.1743×10^{-3}	1.0253×10^{-3}
80 dB	8.2245×10^{-4}	1.1813×10^{-3}	1.0261×10^{-3}
60 dB	2.6044×10^{-3}	1.9472×10^{-3}	1.4816×10^{-3}

제안한 유연 IED 플랫폼 구조가 전력선 주파수 모니터링 목적에 적합한지 실제 플랫폼 구현을 통해 타당성 검토를 하였고 결과를 그림 4에 나타냈다. 오류시점 데이터 전송 시간 측정을 위해 링버퍼의 크기를 오류시점 ± 32 cycles로 설정하

였다. 링버퍼의 데이터를 중앙서버로까지의 전송시간을 측정 한 결과 10ms 미만, 즉, 평균 샘플 전송시간이 $1/f_s$ 의 0.78% 미만으로 측정되어 제안한 설계의 타당성을 확인하였다. 또한, 주파수 모니터링 S/W를 적용한 결과 수행시간이 170 μ s로 측정되어 최대 허용 latency, 즉, $1/f_s$ (625μ s)에 비해 상당히 작아 추가적인 알고리즘 적용도 가능하다는 것을 확인하였다.

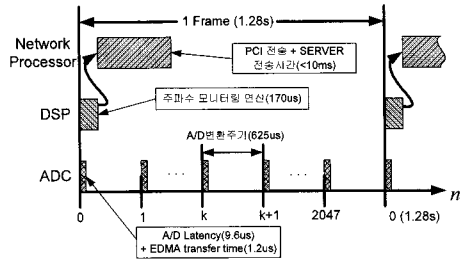


그림 4 유연 IED 플랫폼 실험 적용 결과
Fig. 4 Simulation results of the flexible IED platform

3. 결 론

본 논문에서는 보호계전의 기반이 되는 정밀하면서 신속한 주파수 추정을 위한 새로운 알고리즘을 제시하였고, 이를 바탕으로 하여 전력선 주파수 모니터링을 위한 유연 IED 플랫폼 구조를 제시하였다.

제시한 주파수 추정 알고리즘은 낮은 복잡도를 가지고, 모의실험 결과 기존의 ECKF 알고리즘 및 demodulation 알고리즘에 비해 빠른 수렴속도를 보였으며, 특히 높은 SNR에서 더 정밀한 추정 성능을 보였다. 또한 본 논문에서 제시한 주파수 모니터링 IED 플랫폼의 모의실험결과 실제 데이터 샘플링 간격의 1% 미만에 달하는 전송능력을 보여 실시간 계통보호에 적용하기에 적합함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부/한국과학재단 우수연구센터(ERC)사업의 지원으로 수행되었음(차세대전력기술연구센터) (R11-2001-093-02006-0). 또한 부분적으로 중앙대 우수연구자 지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] Ackerman, W.J, "The impact of IEDs on the design of systems used for operation and control of power systems", *Power System Management and Control, 2002. Fifth International Conference on (Conf. Publ. No. 488)*, 17-19 April 2002 Page(s):445 - 450.
- [2] S.L. Marple, Jr., *Digital spectral analysis with application*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, Inc., 1987.
- [3] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2002.
- [4] P. K. Dash, A. K. Pradhan, G. Panda, "Frequency estimation of distorted power system signals using extended complex Kalman filter," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 14, No. 3, July 1999.
- [5] M. Akke, "Frequency Estimation by Demodulation of Two Complex Signals," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol.12, No.1, pp.157-163, Jan. 1997.