

광역보호를 위한 주파수 측정기법에 관한 연구

박철원*, 김윤상**, 김철환***

강릉대학교*, 한국기술교육대학교**, 성균관대학교***

A Study on Frequency Measurement Technique for Wide Area Protection

Chul-Won Park*, Yoon Sang Kim**, Chul-Hwan Kim***

Kangnung National University*, Korea University of Technology and Education**, SungKyunKwan University***

Abstract - 근래 초기고장(seed fault)에 대한 적절치 못한 대책들이 광역정전으로 파급되어 그 피해정도가 매우 심각하다. 전력의 안정적 공급에 대한 중요성이 새롭게 부각되고 그 예방책에 대한 다각적인 연구가 요구되고 있다. 이에 위성망을 이용한 위기 관리시스템에 대한 필요성이 제기되었다. 본 논문에서는 광역보호를 위해 sPMU(satellite Phasor Measurement Unit), 전력계통 상태감시장치(Power System Dynamic Monitor:PSDM)에 중요한 요소로서 전력계통에서 가장 중요한 지표중의 하나인 주파수에 대한 여러 가지 측정방법을 다룬다. 향후 정상상태와 과도상태에서도 측정시간 단축과 측정오차를 줄일 수 있는 최적의 주파수 계측기법을 개발하기 위함이다.

1. 서론

지난 5월 전남 여수 국가산업단지는 두 번의 대규모 정전사태를 겪었다. KEPCO는 사고 발생 10시간여만에 피뢰기를 교체하고 전력공급을 재개했으나 깜빡할 새 발생한 전력중단은 여천 S/S를 통해 전력을 공급받는 대형 화학공장들이 연쇄적으로 타격을 입게 되어 사실상 올 스톱되면서 1000억대 손실이 발생되었다. 또 지난해 삼성전자 경기도 시흥공장의 정전사고는 배전관련기기와 부품 등 설비 자체에서 발생한 오류 때문에 일어났다는 결론이 내려졌지만, 당시 조유의 정전에 의해 일부 생산라인 가동이 중단되는 등 400억원의 피해와 함께 최첨단 반도체 업체로서의 명성에 흠집이 나는 등 세계적 뉴스가 되기도 했다.

KERI는 3년간 국내 기업 2018개를 표본으로 삼은 “산업용 수용가의 정전비용 조사연구” 보고서에서 국내 석유 화학 공장에서 3초 이하의 순간 정전사고가 발생해도 규모는 2억7600만원에 달하고, 또 30분 이하인 경우 피해액이 건당 4억2600만원에 달하며 전기전자부품은 3초 이하 정전피해액이 1억2000만원에 달한다고 한다. 현재 핵심 산업시설들이 정전과의 전쟁을 벌이고 있다고 해도 과언이 아니다.

정전 원인에 대하여 피해 업체와 KEPCO간 공방이 빚어지고 있는 곳도 있지만, 대체로 자체 방재센터 설치와 전력 공급선의 2중화, 노후설비에 대한 보완, 비상발전기와 무정전 전원공급장치 설치와 아울러 특정 구간만 전기를 차단하는 신뢰성 있는 보호계전 시스템을 갖춰야한다며 그 예방책 마련과 시급성에 입을 모으고 있다.

한편 막대한 국가적 손실을 초래할 수 있는 광역정전(wide area outage)에 대한 대책으로 GPS(Global Positioning System)를 이용하여 대응량 발전소 및 주요 전력소로부터 시각 동기화된 운전자료를 실시간으로 감시, 분석하는 기술개발이 가장 효과적인 대안으로 알려져 지고 있다. 이에 미국은 약 70-80, 중국은 3000, 유럽에는 수백대가 보급되고 있다. 근래에 대한전기학회 전기의 세계에 2-3회에 걸쳐서 광역정전과 계통보호제어 기술 특집이 소개된 바 있다[1-6]. 고장들의 확률적인 해석과 인과관계 분석, 고장들의 파급양상 시나리오 수립, 실시간 상황정보 수집과 지식기반 시스템 구현에 대하여 연구 중에 있다[7]. 또 Web 기반 전력통합관리시스템이 제안되어, 시제품 위성망을 이용한 위기관리 시스템이 제주도 말·변전소 12개소에 설치 시범운영 중에 있다[8].

GPS 시스템을 이용하여 정밀한 시각동기(time synchronized)를 얻기 위해서는 시각 측정의 정밀도를 감소시키는 오차요인들을 효과적으로 보정하기 위한 알고리즘 개발이 선행되어야 한다. 실시간 동기 페이저를 측정하기 위한 기술적 사항은, 크게 GPS를 이용한 시각 동기 문제와 페이저 측정의 정확도를 높이기 위한 사항으로 나뉘어 진다[9]. 특히 전력계통 데이터 취득 및 인공위성을 이용한 전송 장치인 위성페이저 측정장치(sPMU:satellite Phasor Measurement Unit)는 우선 전압과 전류, 주파수, 위상각, 유효전력 및 무효전력 등에 대한 데이터들을 계속하여 수집해야 하는데, 기본적으로 Sliding DFT 순환 알고리즘이 근간을 이룬다.

특히 계통주파수는 전력계통 운용에 있어서 가장 중요한 지표중의 하나인데, 정확한 주파수 측정이 요구될 뿐만 아니라 빠른 수렴성과 잡음에 강인해야 한다. 초기에는 아날로그 측정 장치가 사용되다가 근래에는 영점통과(zero-crossing) 내부 클럭을 계산한 후 위상각으로부터 주파수를 계산하는 방법이 탑재된 디지털 주파수계전기와 미터류가 급속히 보급되고 있다. 그런데 이 방법은 소자가 노화되거나 온도 등에 의하여 파라미터의 특성이 변화할 수 있기 때문에 정확하고 신속한 응답을 얻는데 한계가 있을 뿐만 아니라 잡음이 섞인 왜곡된 입력신호로 인하여 영점통과 포인터가 이동하거나 중복적인 영점통과를 나타내는 등 측정에 많은 오차를 포함하게 되는 단점이 발생할 수 있다. 이에 약 20여년전

부터 comparator를 제거해 하드웨어를 간소화하고 신호처리 소프트웨어로 이용하여 주파수를 측정할 수 있는 디지털 알고리즘들이 제안되었다.

해외에서는 1983년 A.G. Phadke와 J.S. Thorp 등은 DFT에 의해 전압의 기본파 페이저를 추출한 후, 전압의 정상분(positive sequence component) 페이저 상차각(phasor angle)의 변화율을 이용하여 계통의 주파수와 주파수 변화율을 측정할 수 있는 기법을 발표하였다[10]. TaO와 Morrison은 전압의 샘플링 데이터를 사용하여 주파수를 측정하는 방법을 제안했으며[11] Sachdev와 Sidhu는 디지털 신호처리를 이용한 반복기법을 제시하였다[13]. 또 A.T. Johns와 P.T Moore는 고속 FIR 필터를 이용한 주파수 측정 기법을 제안하였다[12,14]. 칼만필터 방법[15]은 모델링된 신호에 대해서 빠르고 정확한 주파수 측정이 가능하지만, 모델링이 되지 않은 신호가 포함될 경우에는 오차가 발생되었고, 삼상 위상 고정루프 방법[16]은 불평형 조건에서 정확성이 떨어지는 단점이 있다. 이외에 신경회로망을 이용한 방법[17]과 최소자승법[18], 프로나(Prony) 방법[19], 적응형 노치필터(adaptive notch filter)[20] 등과 같이 다양한 기법들이 발표되었다. 최근 Wen과 Liu 등은 스마트한 이산푸리에 기법(SDFT:smart discrete Fourier transform)를 이용한 주파수 측정 기법들이 제시되었다. 또 광역 주파수 편이(deviation)시의 측정오차와 연산량, 고장시의 추정 문제 등이 제기되었다[21-22].

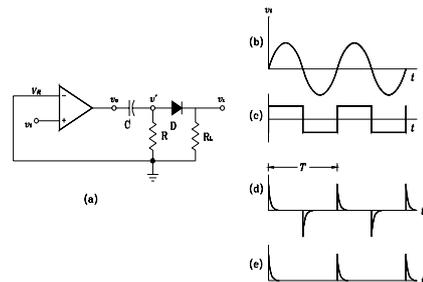
국내에서는 2001년 FIR필터를 이용한 전력계통의 주파수 측정에 대한 논문[23]이 발표된 이후, 정상상태 및 고장상태에서도 주파수 측정이 가능 기법[24]이 제안되었다. 또 2004년 디지털 위상 고정 루프를 이용한 정밀주파수 측정장치[25]가 제안되었고, 코사인 필터와 사인 필터의 이득차를 이용한 주파수 측정기법이 제안되었다[26]. DFT 필터의 오차를 감소시키는 보상을 제안하여 주파수 계측오차를 줄이는 방안이 발표되었다[27]. 또 보호계전기에서 요구되는 자동적인 계전기의 보호 동작, 계통변화에 효과적으로 유연하게 대처할 수 있는 적응성, 사회성(social ability)을 만족시킬 수 있는 멀티에이전트 시스템(multi-agent system) 기반 주파수 계전 알고리즘 구현에 관한 논문이 발표되었다[28].

본 논문에서는 광역보호에 사용될 Web 기반 모니터링 시스템이나, PMU의 계측에 활용할 수 있는 디지털 주파수 알고리즘을 위하여 종래의 여러 가지 주파수 계측 알고리즘을 검토해 보고자 한다.

2. 영점통과검출기에 의한 주파수 측정

그림 1은 영점통과검출기에 의한 주파수 측정을 나타낸다. 만약 V_R 을 0으로 하면 입력이 영을 지날 때마다 출력은 한 상태에서 다른 상태로 급격하게 변할 것이다. (b)와 같이 OP AMP의 입력이 정현파이면 출력은 (c)와 같이 대칭적인 구형파가 된다. 구형파출력 v_o 는 RC적렬 회로의 입력에 인가되며 시정수 RC가 정현파입력의 주기 T에 비해 극히 작다면, R양단의 전압 v' 는 (d)와 같은 양과 음의 일련의 펄스로 된다. 만일 v' 을 이상 다이오드를 갖는 클리퍼에 인가하면 부하전압 v_L 은 양의 펄스만을 포함하게 된다. 결국 정현파는 간격이 T인 일련의 양의 펄스로 변환된다. (a)의 회로구성에 의해 정현파는 일련의 펄스로 변환되어 위상을 구하는 식(1)에 의하여 주파수를 추정할 수 있다. 여기서, f:주파수, T:기본 클럭의 주기, N:영점통과 클럭의 개수이다.

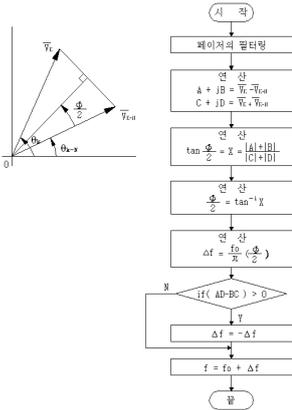
$$\Phi_1 = 2\pi fTN_1, \Phi_2 = 2\pi fTN_2, \Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (1)$$



<그림 1> 영점통과를 이용한 위상 측정

3. 디지털 주파수 측정기법

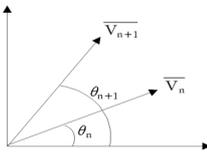
3.1 재귀적 DFT 필터를 이용한 주파수 측정



〈그림 2〉 rDFT에 의한 추정

3.2 DFT 필터를 이용한 주파수 측정

$$\Theta_{n+1} - \Theta_n = \tan^{-1} \left[\frac{V_{r,n} V_{i(n+1)} - V_{i,n} V_{r(n+1)}}{V_{r,n} V_{r(n+1)} + V_{i,n} V_{i(n+1)}} \right] \quad (2)$$



〈그림 3〉 전압페이저의 회전

3.3 최소자승법을 이용한 주파수 측정

측정 윈도우내 주파수가 일정하게 유지되는 경우와 주파수가 시간에 따라 변하는 경우 각각 주파수 편이를 계산하면 식(3), 식(4)이 된다.

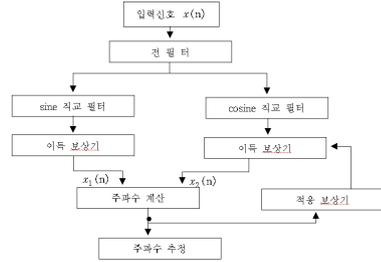
$$f - f_0 = \sqrt{\frac{X_2^2 + X_4^2}{X_1^2 + X_3^2}} \quad (3)$$

$$\frac{df}{dt} = b = \frac{y_6 y_1 - y_5 y_3}{y_1^2 + y_3^2} \quad (4)$$

〈참고 문헌〉

- [1]. 남해근, 전영환, “광역정전 사례 분석”, 대한전기학회, 전기의 세계, 제52권 제11호, pp. 24-32, 2003.
- [2]. 전동훈, 이재욱, “페이저 측정장치(PMU)의 개발 및 응용”, 대한전기학회, 전기의 세계, 제52권 제11호, pp. 39-49, 2003.
- [3]. 배주천, 김일경, “우리나라의 전력계통 운영현황과 광역고장 대책”, 대한전기학회, 전기의 세계, 제52권 제11호, pp. 50-54, 2003.
- [4]. 김상태, 최미화, 이정현, 지철민, 이영송, “Multi-Agent 기법 기반의 전력인프라 Defense System을 위한 Network 구축기술”, 대한전기학회, 전기의 세계, 제54권 제6호, pp. 24-29, 2005.
- [5]. 박경원, 장수형, 박장수, 신영준, “광역계통 감시제어를 위한 시작동기와 위상 측정기술”, 대한전기학회, 전기의 세계, 제54권 제6호, pp. 30-34, 2005.
- [6]. 이승재, “에이전트기반 적용형 광역정전방지 기술”, 대한전기학회, 전기의 세계, 제54권 제8호, pp. 26-31, 2005.
- [7]. 이승철, 문은철, 이정우, “실시간 광역정전 해석 및 대처기반 기술 연구”, 산업자원부 전력선행연구 최종보고서, pp. 1-138, 2008. 3.
- [8]. 권대윤, 정일권, 이현모, “위성통신과 GPS를 기반으로 한 동기위상 데이터 측정장치 개발”, 전력계통보호 제어 연구회 논문집, pp. 101-111, 2008. 3.
- [9]. 권세혁, 양해원, 장태규 외, “광역 전력계통 감시 신호처리 및 GPS 적용 기술에 관한 연구”, 산업자원부 전력선행연구 중간보고서, 2000. 9.
- [10]. A.G. Phadke, J.S. Thorp, “A new measurement technique for tracking voltage phasor, local system frequency, and rate of change of frequency”, *IEEE Trans. on PAS*, Vol. PAS-102, No. 5, pp. 1025-1034, May 1983.
- [11]. H. Tao and I. F. Morrison, “The measurement of power system frequency using a microprocessor”, *Elect. Power Syst. Res.*, Vol. 11, pp. 103-108, 1986.
- [12]. P.J. Moore, A.T. Johns, “Frequency relaying based on instantaneous frequency measurement”, *IEEE Trans. on PD.*, Vol. 11, No. 4, pp. 1737-1742, October 1996.
- [13]. T.S. Sidhu, M.S. Sachdev, “An iterative technique for fast and accurate measurement of power system frequency”, *IEEE Trans. on PD.*, Vol. 13, No. 1, pp.109-115, January, 1998.
- [14]. P.T. Moore, R.D. Carranza, and A.T. Johns, “Model System Tests on a New Numeric Method of Power System Frequency Measurement,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 2, pp. 696-701, April 1996.

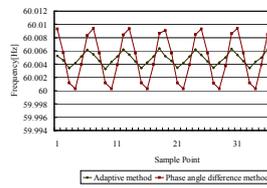
3.4 고속 FIR 필터를 이용한 주파수 측정



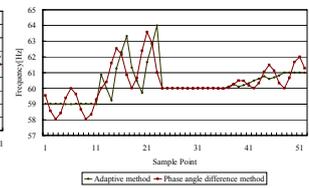
〈그림 4〉 이득 보상기에 의한 측정

4. 사례연구

전원이 154[kV]인 160[km]의 공장을 갖는 병행2회선 송전선로를 모델 계통으로 삼았다. 샘플링 수, 주파수, 고장발생시점, 사고각, 고장거리를 가변하며 다양한 데이터를 확보하였다. 미소한 변화에 따른 편이 추정을 위해 EMTP로 얻기 어려운 데이터는 스프레드시트 프로그램을 이용하여 사용자가 고조파 함유 정도와 크기의 변동 등을 정의한 합성 파형으로 수집하여 시뮬레이션을 하였다. 그림 5와 그림 6은 전압크기와 주파수를 가변했을 경우의 주파수 추정 결과이다[23,24].



〈그림 5〉 전압크기의 가변



〈그림 6〉 주파수 가변

5. 결론

전력산업의 구조 개편과 아울러 급증하고 복잡화하는 전력수요는 전력 계통의 안전성(security)과 안정성 확보가 더욱 요구되고 있다. 근래 순간정전과 초고속고장에 대한 지속적인 대응조치와 보호제어장치들의 오·부동작에 따라 과급된 광역정전으로 인한 피해가 국가와 사회적으로 심각해지고 있다. 이에 위성통신과 GPS를 기본으로 하는 PMU와 Web 기반 모니터링 시스템의 필요성이 절대적으로 요구되고 있다. 본 논문에서는 광역보호를 염두 해두고 PMU의 계측과 모니터링 시스템에 사용되는 주파수에 대한 종래의 여러 가지 계측알고리즘을 검토하였다.

- [15]. P.K. Dash, A.K. Pardhan, and G. Panda, “Frequency estimation of distorted power system signals using extended complex Kalman filter”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, pp. 761-766, July 1999.
- [16]. V. Kaura, V. Blasko, “Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions”, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 33, pp. 58-63, Jan. 1997.
- [17]. P.K. Dash, D.P. Swain, A. Routray and A.C. Liew, “An adaptive neural network approach for the estimation of power system frequency”, *Elect. Power Syst. Res.* Vol. 41, pp. 203-210, 1997.
- [18]. M.S. Sachdev, M.M. Giray, “A least square technique for determining power system frequency”, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, Vol. 14, PAS-104 pp. 437-443, 1985.
- [19]. T. Lobos, J. Rezman, “Real-time determination of power system frequency”, *IEEE Trans. on Instr. and Meas.* Vol. 46, No. 4, pp. 877-881, Aug. 1997.
- [20]. P.K. Dash, B.R. Mishra, R.K. Jena, and A.C. Liew, “Estimation of power system frequency estimation using adaptive notch filter”, in Proc. EMTD'98, IEEE Cat. No. 98EX137, pp. 143-148, 1998.
- [21]. T.S. Sidhu, “Accurate measurement of power system frequency using a digital signal processing technique”, *IEEE Trans. on I&E.M.*, Vol. 48, No. 1, pp. 75-81, February, 1999.
- [22]. Jun-Zhe Yang, Chih-Wen-Liu, “A precise calculation of power system frequency and phasor”, *IEEE Trans. PD.*, Vol. 15, No. 2, pp. 492-499, April, 2000.
- [23]. 박철원, 남시복, 신명철, “FIR 필터를 이용한 전력계통의 주파수 추정기법”, 대한전기학회 논문지, Vol. 50P No. 3, pp. 101-108, 2001.
- [24]. 박철원, 남시복, 신명철, “적용기법을 이용한 전력계통의 주파수 측정”, 대한전기학회 논문지, Vol. 51A No. 3호, pp. 143-152, 2002.
- [25]. 이상정, 황동환, 박장수 외 6인, “디지털 위상 고정루프를 이용한 계전기술 정밀 주파수 측정장치”, 대한전기학회 논문지, Vol. 53A No. 7, pp. 365-374, 2004.
- [26]. 남해근, 강상희, 박종근, “코사인 필터와 사인 필터의 이득차를 이용한 주파수 측정”, 대한전기학회 논문지, Vol. 55A No. 6, pp. 249-254, 2006.
- [27]. 박종찬, 김병진, “고속의 주파수 계측 알고리즘을 갖는 저주파 계전기 설계”, 대한전기학회 논문지, Vol. 55P No. 1, pp. 1-5, 2006.
- [28]. 이병현, 여상민, 김철환, “EMTP-MODELS를 이용한 Multi-Agent System 기반의 주파수 계전 알고리즘 구현”, 대한전기학회 논문지, Vol. 56A No. 12, pp. 2072-2077, 2007.