

광역계통 감시제어를 위한 시각동기화 위상측정기술

□ 박경원, 장수형, 박장수, 신영준 / LS산전(주) 전력연구소

서론

iPIU (intelligent Power system Information Unit)는 계통의 주요지점에 설치되어 전압, 전류의 페이지를 인공위성에서 수신된 시각동기에 맞춰 취득, 가공, 고속전송하는 역할을 수행, 전체 광역 감시시스템의 입력부를 담당한다. 광역보호 알고리즘을 수행하기 위한 기초 data를 실시간으로 정확하게 계측하여 빠른 속도로 상위에 전송해야 한다.

본 기고에서는 광역감시 시스템의 입력 부를 담당하는 iPIU가 계측해야 하는 동기 페이지에 대해 살펴본다. 동기페이지의 의미와 시동기를 위한 하드웨어 구성 그리고 계통 주파수가 정격에서 벗어났을 때 계측 정밀도에 끼치는 영향을 살펴본다.

페이지와 동기 페이지

페이지(Phasor)는 수학적 관점에서는 2차원 벡터이지만, 각 위치는 공간이 아닌 시간의 위치를 나타낸다. 즉, 전력계통의 순시치 신호는 복소수 형태를 가지는 페이지로 나타낼 수 있다. 다음 식 (1)과 같은 함수를 페이지로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \phi) \quad (1)$$

$$\bar{X} = X_r + jX_i = \frac{X_m}{\sqrt{2}} e^{j\phi} = \frac{X_m}{\sqrt{2}} \angle \phi \quad (2)$$

위의 식에서 정의된 페이지 \bar{x} 는 복소수이며 그 크기는 주어진 함수의 RMS(Root Mean Square)값을 가지며, 각 주파수가 ω 임을 가정하고 있다. 이와 같이 순시치 신호를 페이지로 나타냄으로써, 신호의 연산을 쉽게 할 수 있고 두 함수의 상관관계를 쉽게 알 수 있다.

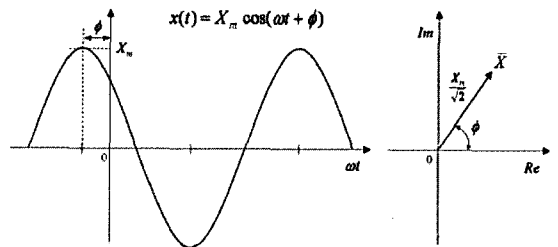


그림 1a 순시치 신호와 페이지 표현

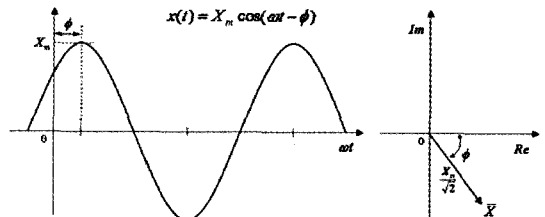


그림 1b 순시치 신호와 페이지 표현

그림 1a에서와 같이 순시치 함수의 최대값이 y축의 좌측에 있을 때, 위상각은 최대값과 y축 사이 거리의 크기를 가진 양수 값을 가지며, 복소평면의 실수축에서 반시계 방향으로 회전된 페이지로 나타낼 수 있다. 함수의 최대값이 원점의 우측에 있을 때, 위상각은 최대값과 원점 사이 거리의 크기를 가진 음수 값을 가지며, 복소평면의 실수축에서 시계 방향으로 회전된 페이지로 나타낼 수 있으며 그림 1b와 같다. 이와 같이 위상각을 구하기 위해서는 그림 1a과 1b의 원점과 같은 기준이 되는 지점을 알아야 한다.

서로 다른 두 지점에서 그림 2와 같이 같은 크기와 위상을 가지는 동일한 신호가 존재한다고 가정한다. 두 지점에서 그림 2의 R_1 과 R_2 의 각각 다른 기준점을 가지고 위상각을 측정하면, 두 지점 사이에 위상차가 존재한다고 판단할 것이다. 따라서, 두 지점의 위상차를 정확하게 측정하기 위해서는 같은 기준점을 가져야 한다. 페이지는 앞서 언급했던 것처럼 시간을 기준으로한 벡터이므로 기준시간을 갖게 함으로서 서로 다른 지점의 페이지라할지라도 동일한 평면에 표현할 수 있다.

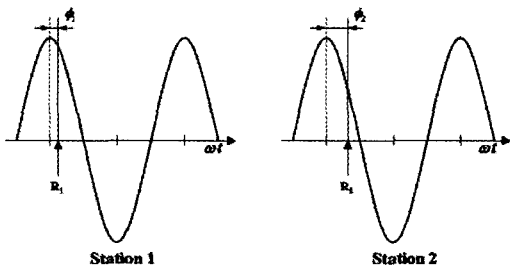


그림 2 서로 다른 기준점을 가진 두 지점의 신호

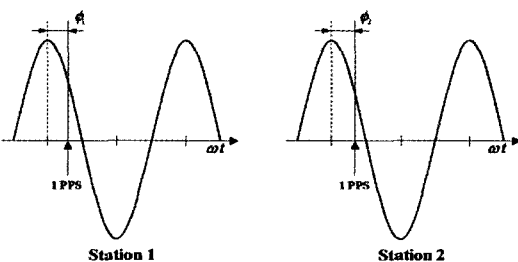


그림 3 동기신호를 기준으로 한 두 지점의 신호

1 PPS(Pulse per Second)의 동기신호(Synchronizing Signal)를 적용하여 위상각을 측정하면 그림 3과 같다. 여기에서 사용되는 1 PPS 동기신호는 모든 지점에서 정확하게 동일한 신호이기 때문에, 이 동기신호를 기준으로 위상각을 측정하면, 두 신호의 위상 관계를 정확하게 계산할 수 있다. 이와 같이, 동기신호를 기준으로 하여 측정된 페이지를 동기 페이지(Synchrophasor or Synchronized phasor)라고 한다.

규격에서는 UTC(Universal Time Coordinated, 세계 협정시)의 1 PPS를 동기신호로 사용하여 위상각을 계산하도록 정의하고 있다. UTC를 사용하기 위해서는 각각의 지점에 설치된 iPIU에 동기신호를 전송해야 한다. 이러한 신호를 전송하는 방법에는 GPS(Global Positioning System), GOES(Geostationary Operational Environmental Satellite), GLONASS, GALIEO, INMARSAT(International Maritime Satellite System)과 같은 위성 시스템을 이용하는 방법과 지상에서 전파, 광섬유와 같은 수단으로 신호를 전송하는 방법이 있다.

동기 페이지 측정을 위한 H/W구성 및 동작 원리

GPS(Global Positioning System; 범 지구 측위 시스템)는 미국 정부가 1970년대 초반부터 개발에 착수하여 약 60억불의 예산을 투자하여 구축한 항법지원시스템으로 지상, 해상, 공중 등 지구상의 어느 곳에서도 시간 제약 없이 인공위성에서 발신하는 정보를 수신하여 정지 또는 이동체의 위치를 측정할 수 있도록 구성되어 있는 전천후 위성측정 시스템이다. GPS는 초기에는 군사목적으로 개발을 시작하였으나 GPS 신호의 일부를 민간인이 사용할 수 있도록 하여, GPS 신호 중 L1, C/A 코드는 민간인에게도 개방되었다. GPS 위성에서 방송하는 코드를 이용하면 전 세계 어디에서나 전천후로 24시간 측위가 가능하며, 그 정확도는 약 100m 정도이다. 또한, GPS 위성에는 지극히 안정도가 높은 원자시계를 탑재하여 안정된 시간데이터를 제공한다. 각 GPS 위성에서 발신하는 위성신호는 위성시간, 궤도, 위성상

태와 UTC에 관한 정보를 수록하고 있다.

지구상에 위치하게 되는 GPS 수신 장치는 정확도를 향상시키기 위하여 복수의 GPS신호를 이용하여 위치 및 시간 Data를 복조하여 사용자에게 제공한다. GPS가 제공하는 Data중 하나인 1 PPS(Pulse Per Second)는 일반적으로 수백 nsec의 정밀도를 가지며, iPIU는 이러한 1 PPS신호를 기반으로 동기 신호를 취득한다. 광역 시동기를 위하여 GPS으로부터 취득한 1 PPS 신호는 실제적인 A/D(Analog to Digital) 변환을 위해서는 직접적으로 사용이 어려우므로 PLL(Phase Locked-Loop) 회로 등을 사용하여 실제 A/D 변환을 위한 fs(frequency-sampling)를 추출한다.

GPS 수신 장치는 안테나 기기의 파손 등으로 인하여 전파 신호를 이용하지 못할 경우에도 일정시간 동안은 사용자에게 정확도 Time Data를 제공하여야 한다. 이러한, 시간 유지 기능은 Holdover라 지칭이 되며, 고가의 OCXO(Oven Controlled Crystal Oscillator)등을 사용하여 구현한다.

A/D 변환된 교류 신호의 크기는 후술하는 Phasor 측정 기술을 통하여 연산되고, 결과값은 통신 Module을 통하여 상위 시스템과 연결이 되며, 국제적으로 공인된 프로토콜인 IEEE 1344를 이용하여 전송 된다. 그러나, IEEE 1344는 곧 PC 38.118 규격으로 대체 될 예정이다.

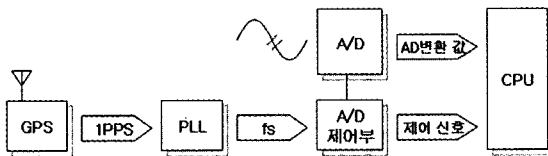


그림 4 GPS 신호를 이용한 A/D 변환

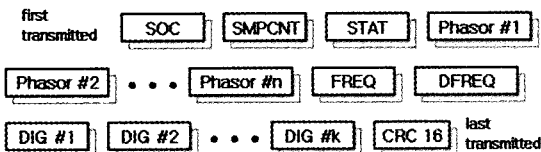


그림 5 IEEE 1344 Data frame for phasor data

표 1 IEEE 1344 Data frame for phasor dataName

Name	Simple Description	Byte Size
SOC	Second of Century	4
SMPCNT	Sample Count	2
STAT	Status Word	2
Phasor	전기량의 정상분 크기	4
FREQ	Frequency	2
DFREQ	Deviation Frequency	2
DIG	Digital Channel Data	2
CRC 16	$X^* 16 + X^* 12 + X^* 5 + 1$	2

다음은 일반적인 iPIU와 상위 시스템간의 구성도이다.

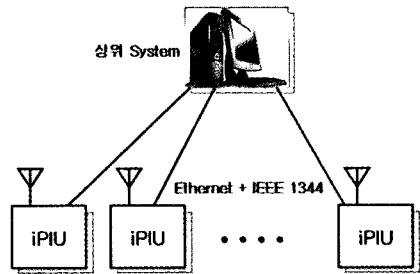


그림 6 iPIU와 상위 시스템간의 구성도

페이저 측정 기술

실시간으로 측정된 교류파형의 전압신호로부터 페이저를 계산하는 방법 중 가장 대표적인 DFT (Discrete Fourier Transform)는 주파수 분석에 기초한 직교변환법이며 다음 식 (3)와 같이 정의한다.

$$X_k[n] = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{kn} \quad , \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3)$$

여기서, $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}} = \cos(2\pi/N) - j\sin(2\pi/N)$

- N : 윈도우 크기
- k : 고조파 차수 (0: DC 성분, 1: 제1고조파, 2: 제2고조파, ...)
- x : 입력신호
- X_k : 고조파 차수 k의 DFT 출력신호

DFT를 이용한 동기 페이저 측정은 다음 그림 7과 같이 1 PPS 동기신호와 샘플링 신호를 일치시킨 후 DFT

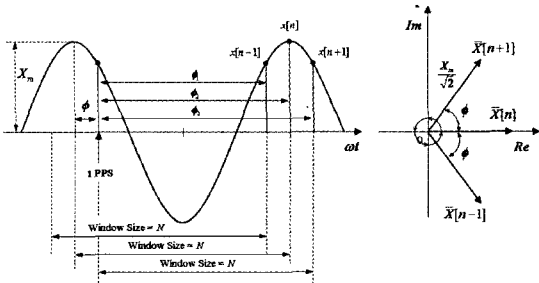


그림 7 DFT를 이용한 동기 페이저 측정

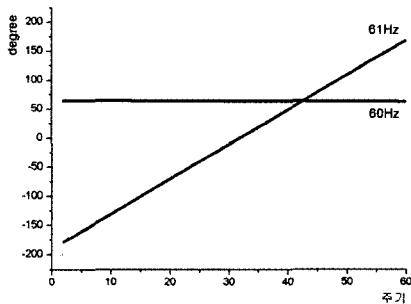


그림 8 정격주파수와 비정격주파수에서 위상각

를 수행한다. 입력신호와 그에 따른 DFT 출력신호는 그림 7과 같다. 입력신호의 $n-1$ 에서 이전의 N 샘플값을 이용하여 DFT한 결과는 $\bar{x}[n-1]$ 이며 위상각은 $-\phi$ 이고, n 에서는 $\bar{x}[n]$ 로 위상각은 0이며, $n+1$ 에서는 $\bar{x}[n+1]$ 로 위상각은 ϕ 이다. 즉, DFT를 수행하는 시점을 기준으로 하여 계산된 위상각을 가진 페이지가 계산되고 시간이 증가함에 따라 페이지는 반시계방향으로 ω 의 각속도로 회전한다.

계통의 주파수가 정격주파수가 아니라면, 즉, 신호의 각 주파수가 $\Delta\omega$ 만큼 증가한 $\omega + \Delta\omega$ 라면, 식 (1)은 다음 식 (4)와 같다. 페이지의 크기는 같지만, 위상각은 시간에 따라 $\Delta\omega t$ 만큼 더 증가한다.

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \Delta\omega t + \phi) \quad (4)$$

그림 8은 정격주파수와 비정격주파수에서 각각 1주기에 1회씩 위상각을 저장하여 표현한 그림이다.

오차 요인 분석과 대책

전압신호를 이용하여 페이지 측정을 하기 위한 전압

신호가 지나야 하는 구간은,

- (1) 전력 선로에 연결된 PT(Potential Transformer)
- (2) iPIU의 2차 PT를 통한 변환
- (3) 아날로그 필터링
- (4) AD 컨버팅
- (5) 디지털 필터링
- (6) 페이지 연산

위의 각 단계마다 페이지 측정 오차를 유발할 수 있는 다양한 요인이 존재한다. 아날로그 신호를 처리하는 (1)~(4) 단계에서는 위상 지연, PT 또는 OP 앰프의 포화, DC 오프셋, 노이즈 등의 문제가 발생하고, 디지털 신호를 처리하는 (5)~(6)에서는 양자화 에러(Quantization Error) 등의 문제가 발생하고, 또한 계통의 주파수가 정격에서 벗어났을 때 오차가 발생한다.

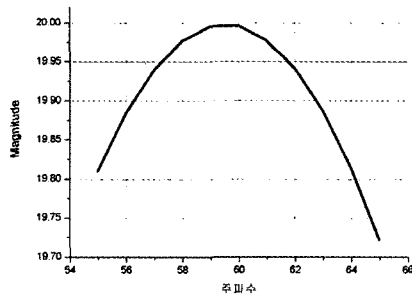


그림 9 주파수의 변화에 따른 실오차 크기의 변화

그림 9는 크기는 20[V]로 고정하고, 주파수만 55Hz에서 65Hz까지 변화시키면서 크기를 측정 한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 정격에서는 오차가 거의 없는 반면 주파수의 변이가 클수록 오차가 커짐을 볼 수 있다.

IEEE PC 38.118에서는 페이지 측정의 정밀도를 나타내기 위한 지수인 TVE(Total Vector Error)를 식(5)과 같이 정의한다.

$$\varepsilon = \sqrt{((X_r(n) - X_r)^2 + (X_i(n) - X_i)^2) / (X_r^2 + X_i^2)} \quad (5)$$

여기서, $X_r(n), X_i(n)$: 측정된 페이지의 실수부와 허수부

X, X_i : 이론적인 페이지의 실수부와 허수부

위와 같이 정의된 TVE는 그림 10과 같이 이론적인 페이지 크기에 대한 이론적인 페이지와 측정된 페이지 차이의 크기 비를 나타낸다. IEEE PC 38.118에서는 TVE가 1% 이하가 되도록 규정하고 있다.

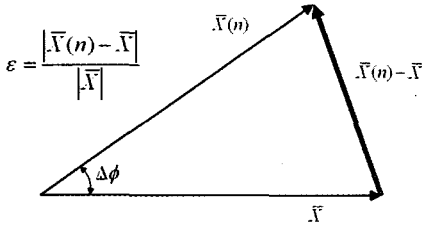


그림 10 TVE (Total Vector Error)

동기신호를 이용한 동기 페이지 측정을 위해서는 페이지 추출시 동기신호를 고려한 연산을 수행하여야 한다. 이 때, 발생할 수 있는 가장 중요한 오차 요인은 동기신호의 불일치이다. 1μs의 동기신호 오차는 60Hz에서는 0.022도 50Hz에서는 0.018도의 위상각 오차를 유발하며, 다음 식 (6)와 같이 계산된다.

$$\Delta\phi = f_{sys} \times 360 \times \Delta t \quad (6)$$

여기서, $\Delta\phi$: 위상각 오차 [deg]

Δt : 동기신호 오차 [s]

f_{sys} : 시스템 주파수 [Hz]

동기신호 오차에 의해 발생하는 위상각 오차는 TVE의 증가를 유발하며 정량적으로 계산하면, 다음 식 (7)과 같다.

$$\epsilon = \sqrt{1 + \left(\frac{|\bar{X}(n)|}{|\bar{X}|}\right)^2 - 2\left(\frac{|\bar{X}(n)|}{|\bar{X}|}\right)\cos\Delta\phi} \quad (7)$$

페이지의 크기가 일치할 때, TVE를 1%이하로 유지하기 위한 위상각 오차와 동기신호 오차는 식 (6)-(7)을

이용하여 계산하면 $\pm 26\mu s$ 이하가 되어 함을 알 수 있다. 즉, 동기신호자체만 볼 때 1μs이하의 오차를 유지하도록 설계하는 것외에 다음 동기신호가 도달하기 직전까지 TVE 1%의 오차범위를 만족시키기 위해서는 1초동안 기준시각으로부터 $\pm 26\mu s$ 이하로 유지되도록 설계 시 많은 고려가 필요하다.

맺음말

얼핏 보면 페이지를 측정하는 것은 아주 단순해 보인다. 하지만 전력계통에서 발생할 수 있는 가혹한 상황을 고려, 가장 나쁜 상황에서도 묵묵히 정확한 값을 측정해야 하는 iPIU는 고도의 H/W 설계기술과 고급 디지털 필터 기술을 필요로 한다.

위에서 살펴본 계측 결과는 단순하게 매 샘플마다 계산되는 값중에서 1주기에 1개의 Data를 추출하여 정밀도에 영향을 끼치는 요인을 살펴보았다. 향후 정밀도를 향상시키기 위해 윈도우의 크기와 정밀도와의 관계, 비정격주파수에서 크기오차를 소거하기 위한 추가적인 샘플 처리기법 또는 디지털 신호처리 기술, 동기신호처리를 위한 하드웨어 설계기술등을 개발하여 국제적으로도 경쟁력있는 제품개발에 힘쓸 것이다.

[참고문헌]

- [1] IEEE Std 1344-1995(R2001) "IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems"
- [2] PC37.118/D6.0 "Draft Standard for Synchrophasors for Power Systems"
- [3] IEEE Power System Relaying Committee Report of Working Group I16, "Understanding Microprocessor-based Technology Applied to Relaying"
- [4] Arun G. Phadke, James S. Thorp, "Computer Relaying for Power Systems"