



GPS를 이용한 광역 전력계통 안정화 기술

■ 윤상현, 추진부*, 이인규** / 프로컴시스템, *한전전력연구원, **한국전력거래소

근래의 전력계통은 산업의 발달과 국민 생활 수준의 향상으로 인해 전력의 수요가 증가함에 따라 전력계통의 규모가 커지고, 이에 따라 전력 품질의 향상과 더불어 안정적인 계통운영이 요구되고 있다. 그러나, 환경 문제와 송전선 설비를 위한 부지확보의 어려움 등의 이유로, 수요는 수도권지역에 밀집되어 있는 반면에 발전소들은 수도권에서 멀리 떨어진 장소에 위치하고 있어서 대용량화된 발전소들로부터 대규모 전력 수송이 불가피하게 되었다. 이러한 송전선의 취약한 구조는 주요 송전선의 사고 발생 시나 발전소들의 사고 발생 시 대규모 정전 사태 등의 결과로 나타날 수도 있다.

이러한 사고를 미연에 방지하고 전력의 수송을 안정하게 하기 위해서는 각 발전소나 변전소에서 실시간으로 계통자료(전압, 전류, 위상, 유효/무효 전력 등)를 취득하여 그 계통자료들을 비교 분석하는 기능이 필요한데 이렇게 취득된 계통자료들은 반드시 같은 시각에 취득한 데이터이어야만 전력계통의 상태를 분석할 수 있다. 그러나 실제적으로 같은 시각에 계통자료를 취득한다는 것이 어렵기 때문에, 이를 위해서 전력 산업에서는 GPS 위성을 이용하여 각 지점의 시각을 동기화시켜 계통자료를 취득하고 해석하는 방법이 활발히 진행 중에 있다.

전력계통에서의 시각 동기 개요

시각동기(time-synchronized) 신호가 전력계통의 요구에 부합되기

위해서는 충분한 가용성과 신뢰성, 정확성을 가지고 있어야 한다. 전력계통에서의 보호·제어 시스템은 시스템의 특성상 어떠한 경우에도 정상적인 동작의 수행이 이루어져야 하기 때문에, 사용되는 동기신호는 중단 없는 가용성을 제공해야만 하고, 취득되는 데이터가 비교될 모든 지역에서 사용이 가능한 신호이어야 한다. 즉, 전지역에 동일한 신호가 동일한 품질로 공급되어야 한다. 동기신호는 데이터 취득 시 사용되는 샘플링 클럭(clock)이 샘플링 정확도 요구치 이내에 유지될 수 있도록 주기적으로 반복되어야 하며, 대부분의 경우 시각 동기 데이터 취득장치에 내장되는 주파수 표준 소자로는 일반 또는 보정 오실레이터(oscillator)를 사용하게 되는데, 이 소자의 정밀도는 GPS 위성에 탑재되어 있는 세슘 원자시계나 루비듐 원자시계보다 정밀도가 크게 떨어진다. 표 1은 현재 사용되고 있는 표준 오실레이터의 종류와 특성을 나타낸다.

가장 신뢰할 수 있고 정확한 주파수 표준은 전자의 에너지 준위에서의 전이(transition) 같은 물리적 현상

표 1 표준 오실레이터의 종류와 특성

오실레이터의 종류	안정성(stability)	Drift/Aging
Hydrogen maser	2×10^{-14}	1×10^{-12} / 년
Cesium beam	3×10^{-13}	3×10^{-12} / 년
Rubidium gas cell	5×10^{-12}	3×10^{-11} / 월
Oven-controlled crystal	1×10^{-9} (0~50°C)	1×10^{-10} / 일
Digital-comp. crystal	5×10^{-8} (0~60°C)	1×10^{-9} / 일
Temp-compensated crystal	5×10^{-7} (0~60°C)	3×10^{-9} / 일
Uncompensated crystal	$\sim 1 \times 10^{-6}$ (per °C)	-



에 비례해서 극도로 정밀한 주파수를 유지할 수 있는 오실레이터이다. 현재 활용 가능한 원자 오실레이터는 수소나 세슘, 루비듐 원자의 전이에 바탕을 두고 있다. 이 중에서 비용과 강인성의 이유로 세슘 오실레이터가 국가 주파수 표준으로 가장 많이 사용된다. 반면에, 일반 컴퓨터나 계측기에서 사용되는 클럭으로는 대부분 크리스탈(crystal)이 사용된다. 일반적인 크리스탈 오실레이터의 경우 drift/aging이 일정하지 않으며, 이 경우 시간이 지남에 따라 주파수가 점진적으로 변하게 되는데, 이를 에이징(aging)이라고 부른다. 크리스탈 오실레이터가 다른 방법으로 온도 보상이 되더라도, 정확한 성능을 유지하기 위해서는 주기적으로 정밀한 주파수 기준으로 보정을 해 주어야 한다[1].

동기신호의 요건

여러 곳으로 분산된 지역에서 페이저(phasor) 등을 측정할 때에는 동기 소스에 의한 공통된 시각 기준이 필요하다. 이를 위해 동기 소스에 의해 제공되는 신호는 협정 세계 표준시인 UTC(Universal Time Coordinated)에 기준되어야 한다. 동기 신호는 1초에 한 번 씩 펄스 신호를 내보내는 기본 반복율을 가지고 있어야 하며, 이 신호의 안정도는 적어도 $1E-07$ 이어야 하고 신뢰도는 99.98%(1달에 1시간의 정전)를 넘어야 한다. 이 신호는 동기 소스의 오차와 신호 수신 장치의 오차를 감안하더라도 시각 동기 데이터 측정장치가 UTC와 $1\mu s$ 이내의 동시성을 유지할만큼 충분한 정확도를 가지고 있어야 한다.

전력계통에서의 동기페이저 측정에 관한 표준을 규정하고 있는 IEEE Standard 1344-1995(IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems)에서 동기 신호의 정확도는 UTC 기준으로 $1\mu s$ 이하가 되도록 요구하고 있다. 이는 60Hz의 주파수로 운용하는 계통에서 0.022° 의 각(angle) 정확성을 의미한다[2,3].

아날로그 데이터 취득 시 샘플링 트리거 펄스(sampling trigger pulse)는 1PPS 신호와 동기되어야 한다. 1초당 샘플링 펄스의 수는 정수이며, 1초의 시간 간격에서 고르게 분포되어 있어야 하고, 샘플링하는 지점의 오차는 샘플링 주기의 1%를 넘어서는 안된다. 샘플링 신호 중 첫 번째 신호의 시작은 1PPS 펄스 신호의 시작과 일치하여야 하며, 여기에서의 오차는 $\pm 100ms$ 이내이어야 한다. 샘플링 레이트(sampling rate)는 IEEE Std C37.111-1991에서 정의된 목록 중에서 선택하도록 권장하고 있다[4].

시각 동기 신호의 종류

지금까지 사용되어 온 시각 동기 방법에는 AM이나 FM을 이용한 시각 정보 전송, 광섬유를 이용한 시각 정보 전송, 극초단파(UHF)를 이용한 방법, 마이크로웨이브를 이용한 방법 등이 있으나, 정확도나 비용 면에서 충분한 장점을 지니고 있지는 않다. 현재에는 위성을 이용한 방법이 많이 사용되고 있으나, 대개의 경우 국지적으로 사용 가능하거나 정밀도가 떨어진다. 현재 사용 가능한 방법 중 충분한 정확도를 가지고 있고, 전 세계적으로 사용 가능한 방법은 GPS 위성을 이용한 방법뿐이다. 표 2는 지금까지 전력계통에서 시각 동기용으로 사용되어 왔던 방법들과 특성을 나타낸다.

위성 송출을 이용한 시각 동기는 다른 동기보다 큰 이점이 있다. 위성은 넓은 지역을 담당할 수 있으며, 송출되는 신호는 기상환경이나 계절의 변화에 대해서 거의 영향을 받지 않는다. 그리고, 시각 신호는 계속적으로 국가표준(national standard)에 의해서 보정된다. 초기에는 GPS 신호를 사용하기 위해서 많은 비용이 들었지만

표 2 시각 동기 방법과 특성

종류	사용 주파수	정확도	비고
WWV	2.5~20 MHz	3~5 ms	사용이 줄어들고 있음
WWVB	60 kHz	1 ms	변전소에서 수신이 어려움
OMEGA	10 kHz	2ms	현재는 사용안됨
GOES	468 MHz	100 μs	경우에 따라서 ms 단위의 오차
LORAN-C	100 kHz	1~3 μs	변전소에서 수신이 어려움
GPS	1.58 GHz	< 1 μs	미 국방성에 의해서 검증된 정확도



만, 현재는 사용자가 증가함에 따라서 수신기의 비용이 크게 감소하였다.

GPS 신호의 수신

GPS(Global Positioning System)의 정식 명칭은 NAVSTAR/GPS로 미 해군과 미 공군이 개발한 시스템을 1973년에 미 국방성이 통일하여 명명한 것이다. 위성은 1968년부터 발사가 시작되었으며, 현재에는 24개의 위성으로 구성되어 있다. 위성은 지구를 중심으로 적도면과 55°의 기울기를 가지는 6개의 서로 다른 궤도면에 각각 4개씩 배치되어 있으며, 위성의 고도는 20,200km, 주기는 12시간이다. 사용자가 어느 위치에서 있더라도 4개 이상의 위성으로부터 신호를 수신할 수 있도록 배치가 되어 있으며, 각각의 위성은 2개의 L 밴드 주파수를 송신한다. 이 중 L1은 1,575.42 MHz의 주파수를 가지며 표준 측위용으로 사용되고, L2는 1,227.6 MHz의 주파수를 가지며 고정밀 측위용으로 사용된다. 위성에는 세슘 원자시계와 루비듐 원자시계가 2대씩 탑재되어 있으며, 세슘 원자의 진동 주파수인 9.192631770 GHz를 사용해서 1초를 계산한다.

GPS 위성으로부터 시각정보를 수신하기 위해서는 GPS 수신기와 GPS 신호 수신안테나를 설치하여야 한다. GPS 수신기는 위치 측정용과 시각동기용으로 크게 나뉘어지며, 내부 신호 처리회로의 수에 따라서 1채널 수신기, 2채널 이상의 다채널 수신기로 나뉘어진다. 위성 신호로부터 위치 및 시각을 결정하기 위해서는 4개 또는 5개 이상의 위성으로부터 신호를 수신해야 하므로, 동시에 여러 위성에서 수신된 신호를 처리할 수 있는 5채널 이상의 다채널 수신기가 우수한 성능을 나타내지만 수신기 비용이 상승하는 문제가 있다. 1채널 수신기와 4채널 이하의 다채널 수신기는 시분할 기법을 사용해서 한 채널로 동시에 여러 개의 위성 신호를 처리하기 때문에 수신기의 비용은 낮지만 성능이 떨어지는 단점이 있다.

GPS 신호 수신안테나는 무지향성이므로 설치 방향에는 상관이 없지만, GPS 신호가 미약하기 때문에 안테나는 실외에 설치되어야 하며 권장되는 장소는 주위에 반사체나 건물이 없는 평지 또는 옥상이다. 이는 반

사되는 신호로 인한 간섭을 최소화하기 위한 것이며, 대부분의 GPS 수신장치는 안테나 설치 장소가 평지에 설치되지 못할 경우를 대비해 수신된 신호의 강약을 비교해 반사 신호로 추정되는 신호는 제거하는 알고리즘을 내장하고 있다.

GPS 수신기와 안테나를 연결하는 케이블은 50Ω의 임피던스를 가지며, 미약한 신호를 전송하기 때문에 길이나 설치 위치에 제한을 가진다. 기본적으로 사용되는 케이블의 길이는 15m 정도이며, 거리 측량 등의 목적으로 야외에 설치될 때에는 문제가 되지 않는다. 그러나, 시각동기 데이터 취득장치를 발/변전소의 계전기실에 설치하고, 수신 안테나를 건물 옥상에 설치할 경우 케이블의 길이가 설치상의 문제를 야기할 수 있기 때문에 별도의 케이블을 사용해야 하는 경우도 발생할 수 있으며 이 경우 신호의 손실이 적은 케이블을 사용해야 한다.

시각동기 데이터 취득

각 지역에 설치되는 데이터 취득장치의 시각동기 샘플링을 수행하기 위하여 GPS 수신장치의 시각동기 신호인 1PPS(Pulse Per Second)를 이용한다. 이 1PPS 신호는 GPS 수신장치가 GPS 위성으로부터 정보를 수신하여 초당 1회의 펄스를 발생시킨다.

그림 1에서와 같이 시각동기 신호의 1주기는 1초이며 시각이 바뀌는 순간 시각동기 신호는 Low에서 High의 상태로 바뀌어 0.5초 동안 유지되며, 이후 Low의 상태로 바뀌어 0.5초 동안 유지된다. 따라서 샘플링의 기준으로 1PPS 신호를 이용할 때 시각동기 신호의 상승 edge 또는 하강 edge의 정보를 이용하여야 한다. 이를 위해서 시각동기 신호를 신호취득 프로세서의 외부 인터럽트에 연계하여 1PPS 신호가 High 상태에서

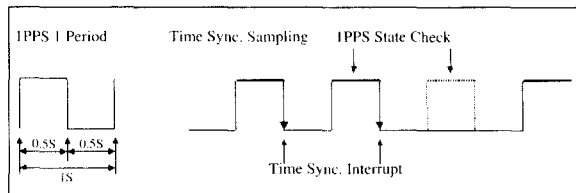


그림 1 GPS 시각동기 신호를 이용한 시각동기 방안

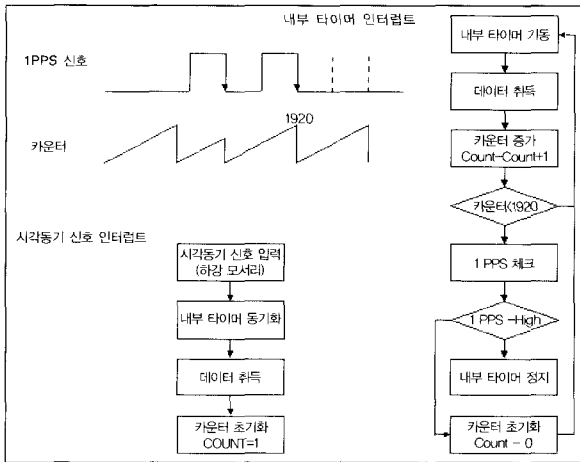


그림 2 시각동기 샘플링 Flow

Low 상태로 변화할 때 신호취득 프로세서에 인터럽트를 발생시켜 샘플링의 기준을 설정하도록 한다. 신호취득 프로세서의 인터럽트가 요청되면 내부 타이머를 기준 시각으로 설정하고, 데이터 취득을 수행한다.

이 과정을 플로우차트로 도식화한 것이 그림 2이다.

시각동기 전력계통 감시/분석장치의 응용 사례

이미 국내에서 개발된 시각동기 데이터 취득장치 (Power System Dynamic Monitor - Transient Stability : PSDM-TS)는 계통의 다지점 동시측정을 위해서 별도의 시각동기 정보를 이용해서 동기된 계통 데이터를 취득할 수 있는 장치이다. 기존의 디지털 레코딩 장치와 유사하지만 PSDM-TS는 GPS 위성에서 송신하는 시각 정보를 기준 시각 정보로 사용해서 감시하고자 하는 지역의 계통자료들이 모두 1 μ s 이내로 동기된다. 따라서 여러 지역 간의 위상 차를 비교하는 것이 가능하게 되며, 취득된 시각동기 데이터는 다량의 데이터를 실시간으로 전송하기 위해 1.544Mbps의 T1급 전용회선을 통해 여러 지점의 계통자료를 집중 감시, 분석할 수 있는 중앙 시스템으로 보내져 사용자가 각 지점의 데이터들을 상시 감시하며, 필요 시 안정도 분석을 실시할 수 있다[5].

그림 3은 PSDM-TS의 시스템 구성을 나타내고 있다.

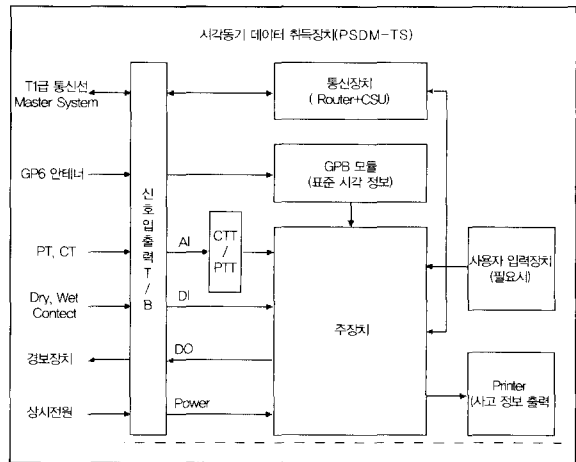


그림 3 PSDM-TS 시스템 구조

그림 4에서와 같이 PSDM-TS에서는 아날로그 48채널, 디지털 32채널에 입력되는 전압, 전류 및 디지털 상태 데이터를 GPS 위성에 의한 시각동기로 취득하며, 각 채널별 실효값, 위상, 각 피더별 유효전력, 무효전력, 전압 정상분, 주파수 측정 및 연산을 실시한다. 또한 단일 장소에서의 사고판단, 경보, 트리거 조건 체크에 의한 순시데이터 기록이 가능하며 연산된 데이터는 표시장치에 의하여 실시간으로 상태를 표시하고, 전용 통신선을 통해 중앙 집중 장치인 마스터시스템으로 전송된다. 기록된 데이터는 인쇄장치를 통해 결과를 출력하며, 통신선에 의해 외부의 장치로 전송될 수 있다.

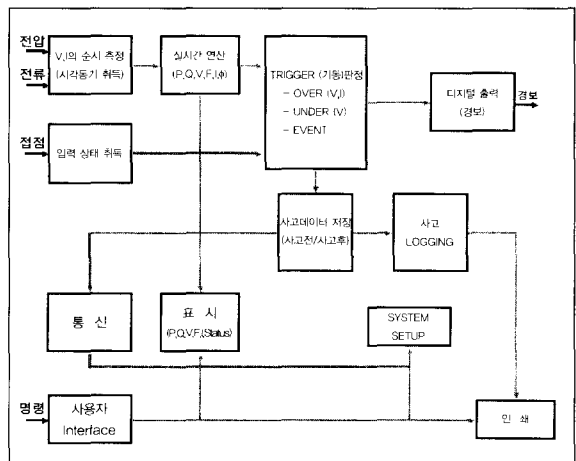


그림 4 로컬 시스템의 전체 기능 구성



PSDM-TS의 각종 환경은 사용자 입력장치에 의하여 입력될 수도 있고, 외부로부터 통신으로 설정이 가능하다[5].

결론

현대 전력계통에서는 산업의 발달과 더불어 전력을 이용하는 다양한 수용가의 수가 증가하면서 송전선에 흐르는 전력의 흐름이 원활하지 못하게 되었는데 이를 뒷받침하여야 하는 송전선로는 환경과 재정상의 이유로 전력 수요의 증가 속도로 새로 건설하는 것이 어려워, 전력을 안정적으로 전달할 수 있는 확률이 점차 감소되어 왔음은 앞에서도 언급한 바 있다. 여기에서 최근 진행되고 있는 전력산업의 구조개편은 전력을 입찰에 의해 결정하게 되고, 따라서 전력의 흐름이 예상할 수 없는 불확실성을 가지게 될 전망이다. 지금까지는 송전선로에 병목현상이 발생하여 안정도가 우려되는 상황일지라도 발전/송전/배전이 한 회사에 의해 소유/운영되어 전력회사는 전력계통의 안전을 해치지 않도록 보수적으로 운용계획을 수립하면 안정도 문제를 어느 정도 극복하는 것이 가능하였다. 그러나, 전력산업의 구조개편 하에서 전력을 입찰에 의해 결정하면 전력 흐름의 통제가 어려워지고 안정도 문제 등 네트워크상의 제약으로 전력의 흐름을 통제하는 것이 가능하더라도 이에 많은 비용을 수반하게 된다. 이러한 새로운 전력계통 운용 환경 하에서 전력계통의 안정도는 더욱

더 위협받을 것으로 예상되고, 전력계통의 빠른 변화를 감시하는 광역감시 시스템과 온라인 안전도 평가의 필요성이 증대할 것임은 자명한 사실이다. 이에 따라 전력을 사용하는 수용가의 요구에 부응하면서 전력계통을 안정적으로 운영하기 위해서는 GPS를 통한 시각동기된 계통자료를 이용하여 전력계통의 안정도를 해석하고 분석하는 시스템의 필요성이 더욱 절실해질 것으로 보인다.

참고 문헌

[1] Bradford W. Parkinson and James J. Spilker Jr, "Global Positioning System : Theory and Applications Vol. 1", Assoc. Eds, vol. 163, pp.29-55, 1996.

[2] IEEE Std 1344-1995, IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems

[3] R. O. Burnett, Jr., "Power System Applications for Phasor Measurement Units", IEEE Computer Applications in Power, 1994

[4] R.E. Wilson, "Methods and Uses of Precise Time in Power Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, January 1992, pp. 126-132

[5] 봉우영 외, "시각동기장치를 이용한 전력계통 온라인 안정성 감시·분석 시스템 개발", 중간보고서, 01 전력연-단336, 한국전력공사 전력연구원, 2001. 8.