

GPS를 이용한 동기페이저측정장치의 EMTP모델 구현

조기선* · 허문준* · 채명석** · 신중린*
*건국대학교 전기공학과 · **군장공업대학

Implementation of Synchronized Phasor Measurement Unit Using GPS

Ki-Seon Cho* · Mun-Jun Heo* · Myung-Seck Chae** · Joong-Rin Shin*
*Konkuk University · **Kun-Jang College

Abstract - More precise operation and control is required to ensure the stability and security of modern large power systems that is a complicated and widely dispersed structure. To ensure the precise operation and control of modern power system, most of all, precise monitoring and measurement of the various state values of power system is required. This paper discusses phasor measurement unit using synchronization signals from the GPS satellite system- Synchronized Phasor Measurement Unit. Considering the power system operation state, the transmitting data format over modems is defined. To provide all available information, PMU process the measurements to generate three phase symmetrical component. This paper proposes the transmitted data format and implements the PMU model using EMTP/Models. The validity of proposed model is confirmed through several contingency on the simple power system.

2. 동기페이저 측정장치

대규모 전력계통의 제어행위는 계통 내의 여러 모선들로부터 얻어진 다수의 페이저를 바탕으로 이루어지기 때문에, 높은 정확도의 상태벡터 동기측정이 요구된다. 이러한 동시성을 만족하지 못하는 페이저측정을 통한 전력계통의 제어는 결국 신뢰성을 보장할 수 없게 된다. 따라서 높은 동기화 정밀도를 유지하는 것은 전력계통의 신뢰성 확보 차원에서 중요하다고 할 수 있다.

지리적으로 넓게 분포된 계통 특성과 높은 정밀도의 확보를 고려할 때 최선의 대안은 무선항법시스템을 이용하는 것이다. 무선항법시스템으로는 크게 Omega와 Loran-C, 그리고 GPS를 들 수 있는데, Omega는 정확도가 상대적으로 낮으며 외란에 민감한 특성을 보이고, Loran-C는 정확도는 좋은 반면에 넓은 대역폭과 Loran-C 신호의 복잡도로 인해 수신기가 고가인 단점을 가지고 있다. 이에 반해 GPS는 L-band 신호를 사용함으로써 높은 정확도를 보장하며 수신기에 대한 연구가 활발히 진행되면서 수신기의 가격이 상대적으로 낮게 형성되고 있다(7). GPS는 미 국방성에서 운용하고 있는 무선항법시스템이기 때문에 신뢰성이 선결되어야 하겠지만, 계속적인 민간이용 범위의 확대를 추진하고 있는 상황이기 때문에 충분히 고려할 만한 시스템으로 평가되고 있다. 따라서 본 논문에서는 높은 정확도의 동기원으로써 GPS를 사용한다.

전력계통의 감시·제어의 관점에서 생각하자면 각 상의 측정치보다는 정상분 측정치가 요구되기 때문에, 계기용 변성기의 2차측으로부터 인력을 받고 해당 정상분 전압과 전류페이저를 계산하는 페이저 측정장치(PMU)를 GPS와 결합하게되면, 높은 정확도의 실시간 상태벡터 측정이 가능하게 된다.

다음 그림은 이러한 기능을 갖는 동기페이저측정장치의 기능을 나타낸 것이다. 아날로그 신호는 계기용 변성기의 2차측으로부터 얻어지고, 점침오차(Aliasing Errors)를 피하기 위해서 필터링 한 후에 샘플링한다. GPS 수신기를 장착하여 샘플링 클럭을 동기화시키고 감시제어를 위해서 데이터를 주컴퓨터로 전송하기 위한 모뎀을 탑재하고 있다. 마이크로프로세서를 통해서 페이저를 신속히 계산하고 전송할 데이터를 구성하게 된다.

1. 서 론

현대 전력계통은 전력수요의 증가에 따라 갈수록 대형화되고 있으며, 민감하고 다양한 특성의 부하와 설비요소가 지리적으로 넓고 복잡하게 분포되어 있기 때문에, 전력계통에 대한 정밀 감시·운용이 매우 어려운 상황이다. 이러한 전력계통의 신뢰도를 증진시키기 위해 실시간 전역 감시 및 안정도 제어에 대한 연구가 요구되고 있으며, 시각 동기 기술의 발달로 페이저 측정장치(PMU : Phasor Measurement Units)를 이용한 감시제어 시스템은 이러한 요구에 대한 효과적인 대안으로 제시되고 있다(1).

전력계통에 대한 운전제어의 높은 정밀성을 확보하기 위해서는 우선적으로 전력계통의 여러 제반 상태값(State Value)에 대한 정밀한 감시·측정(Monitoring & Measurement)이 전제되어야 한다.

지리적으로 넓게 분포된 특성을 갖는 최근 전력계통에서 멀리 떨어진 지점들의 상태벡터 동기측정은 현재의 기술로는 높은 정밀도를 실현할 수 없는 실정이다. 따라서 정도 높은 운전제어를 실현하기 어려우며 새로운 전력계통 상태벡터 측정기술이 요구되고 있는 시점이다(2).

높은 동기화 정밀도를 보장하기 위해 GPS(Global Positioning System)의 시각정보를 동기원으로 활용하는 연구가 활발히 진행중이며, GPS를 이용하여 μs 의 동기화 정밀도와 페이저 측정장치의 결합(동기페이저 측정장치, Synchronized Phasor Measurement Unit)을 통해서 실시간 상태벡터 측정이 가능하며 전력계통의 실시간 정밀제어의 근간을 이룰 것으로 기대하고 있다(3,4,5,6).

이에 본 논문에서는 전력계통의 공급신뢰도를 증진시키기 위한 실시간 전역 감시제어 시스템을 개발하기 위한 기반연구로 GPS를 동기원으로 하는 페이저 측정장치의 모의실험을 위한 모델을 개발하여 실시간 전역감시제어 시스템의 요구조건(Requirement)을 설정하는 데 활용하려고 한다. 이를 위해서 측정한 상태값을 이용하여 페이저를 계산하고, 주컴퓨터에서의 감시·제어 기능을 수행할 수 있도록 측정 및 계산된 상태벡터를 주컴퓨터에 전송하는 기본적인 데이터의 구조를 설계함으로써 데이터 전송행태에 부합하는 동기페이저 측정장치의 모델을 개발하고자 한다. 동기페이저 측정장치의 모델은 EMTP/Models를 이용하여 개발하였으며, 동기페이저 측정장치에서 주컴퓨터로 전송되는 데이터의 구조 및 주컴퓨터의 데이터 요구에 따른 각기 다른 데이터 노드를 생성할 수 있도록 동기페이저 측정장치의 계산기능을 고려하였다. 개발된 모델의 타당성을 조사하기 위해서 모델계통을 선정하고, 모의사고를 가정하여 동기페이저 측정장치의 페이저계산 결과를 검토하였다.

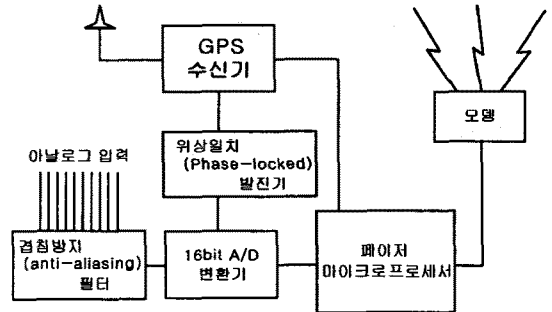


그림 1 동기페이저 측정장치의 블록도
Fig. 1 Block diagram for the synchronized phasor measurement unit

실시간 정밀 감시·제어의 목적을 달성하기 위해서는 마이크로프로세서의 계산속도, 모뎀의 데이터 전송속도, 그리고 데이터 전송량을 고려하여 시스템을 설계해야 하는데, 본 논문에서는 계통상황에 따른 신속한 페이저 전송과 마이크로프로세서의 계산부담 모두를 고려하여 적절한 데이터 전송량을 설정하였다.

3. 전송 데이터 노드 설계

모뎀을 통해서 전송되는 데이터는 계통의 상황 즉, 정상상태(Normal State)와 이상상태(Event State)에 따라 전송할 데이터의 량과 데이터의 전송속도를 고려하여 3가지 형태의 전송 데이터 노드(Data Node)를 정의하였다. 정상상태에는 계산된 정상분 페이지 데이터로만 노드를 구성하고, 이상상태에는 계산된 페이지만을 전송하는 경우와 실제 측정치를 전송하는 경우로 구분하여 데이터 노드를 설정하였다. 데이터 노드에 참조계수필드(TAG필드)를 두어 데이터 노드의 형태를 구분하였다. 즉, 정상분 페이지 데이터로 구성된 경우는 TAG=0, 대칭분 페이지 데이터로 구성된 경우는 TAG=1, 그리고 실제 측정치 데이터로 구성된 경우는 TAG=2로 설정하였다. 전송데이터 노드를 구성하는 각 필드는 전송데이터 노드의 형태에 따라서 다음과 같이 설정하였다.

3.1 정상상태(Normal State)

정상시에 전력계통 상태벡터의 실시간 감시를 위해서는 데이터 노드의 전송속도에 주안을 두어 데이터 노드를 구성하는 것이 합당할 것이다. 따라서 동기페이지측정장치에서 계산된 정상분 전압페이지(PSVP:Positive Sequence Voltage Phasor)와 정상분 지로전류페이지(PSCP:Positive Sequence Current Phasor)데이터만을 주컴퓨터에 전송하도록 하는 데이터 노드를 구성하였다.

표 1 데이터노드 프레임 I
Table 1. Data node frame I

(a)	start bits	TAG (0)	PMU ID	Time	PSVP		PSCP		stop bits		
					Mag	Phase	ID	Mag Phase			
(b)	start bits	TAG (1)	PMU ID	Time	Voltage			Current		stop bits	
					PSVP	NSVP	ZSVP	PSCP	NSCP	ZSCP	
(c)	start bits	TAG (2)	PMU ID	Time	Voltage			Current			stop bits
					VA	VB	VC	ID	IA	IB	IC

정상시 전송되는 데이터 노드의 각 필드는 다음과 같다.

- Start Bits: 전송 데이터 노드의 시작을 알리는 색인계수와 전송 데이터 노드의 오류를 검출하기 위한 Parity bit로 구성, 1byte로 설정
- TAG: 계통 상태에 따라 전송데이터를 선택할 수 있도록 하는 참조계수필드, 2bit로 설정하여 정상시에는 TAG=0로 설정
- PMU ID: 시설된 PMU의 고유번호를 나타낸다. 14비트의 크기로 인전 코딩한다. 경제성을 고려하여 계통에 시설되는 PMU는, 최소의 개수와 최적의 위치선정을 통해서 시설하게된다. 페이지 측정시스템의 측정기 최적배치 연구에 의하면, 실제 계통크기의 1/3수준에서 전력계통의 상태벡터를 측정 및 추정할 수 있음이 밝혀져 있기 때문에 PMU의 고유번호를 나타내는 필드의 크기를 축소하여 설정하였다.
- Time: PMU에서 데이터를 측정한 시각을 알려주는 필드, UTC로 4바이트 설정
- PSVP(Mag & Phase): 정상분 전압페이지로 크기와 위상의 내부필드로 구성
- PSCP(ID): PMU가 시설된 모선의 지로를 식별하는 필드
- PSCP(Mag & Phase): 정상분 전류페이지로 크기와 위상의 내부필드로 구성
- stop bits: 전송 데이터 노드의 끝을 알려주는 색인계수필드, 1byte로 설정

3.2 이상상태(Event State)

사고시에 전력계통의 사후 사고분석을 위해서는 데이터 노드의 전송속도보다는 가능한 모든 정보를 전송하는 것이 유리하고, 사고의 형태에 따라서 모든 대칭분 데이터를 요구하는 경우도 있으므로 모든 대칭분 정보를 제공하는 경우와 실제 측정된 측정치를 제공하는 경우로 구분하여 데이터 노드를 설정하였다. 전송되는 데이터 노드의 각 필드중에서 제어필드는 정상시와 동일하므로 추가된 필드만 보면 다음과 같다.

- TAG: 대칭분 페이지로 구성된 노드인 경우는 TAG=1, 실제 측정치로 구성된 노드인 경우는 TAG=2
- PSVP, NSVP, ZSVP: 대칭분 전압페이지 필드로 각각 크기와 위상으로 구성
- PSCP, NSCP, ZSCP: 대칭분 전류페이지 필드로 각각 지로식별자, 크기, 위상으로 구성
- Voltage(VA, VB, VC): 실제 측정된 3상의 전압측정치로 구성된 필드
- Current(ID, IA, IB, IC): 실제 측정된 3상 지로전류측정치로 각각 지로식별자, 측정치로 구성

이상상태에 대한 이러한 설정에 의해서 요구되는 데이터 노드의 길이를 비교해보면, TAG=1인 경우에 데이터노드는 제어부(start bits, TAG, PMU ID, stop bits)와 시각부(Time), 전압페이지(대칭분(3)×크기, 위상), 지로전류페이지(지로수×대칭분(3)×크기, 위상)으로 구성되고, TAG=2인 경우에는 제어부와 시각부의 크기는 동일하고, 전압페이지(3상전압)와 전류페이지(지로수×3)가 TAG=1의 경우에 비해서 지로수+3만큼의 필드가 절약된다. 따라서 모뎀의 전송속도를 고려하여 주컴퓨터의 계산부담이 증가하더라도 빠른 데이터 전송을 위해서는 실측데이터를 전송하는 것이 유리하다고 볼 수 있다.

3가지 형태의 데이터노드를 형성하기 위해서 PMU내의 마이크로 프로세서는 전압과 전류에 대한 모든 대칭분 페이지를 계산하고 주컴퓨터로부터 제어신호를 입력받아 요구되는 데이터 노드를 구성한다. 데이터노드 전송 전에 데이터노드 전송오류를 검출하기 위해서 우수페리티(even parity)를 기준으로 페리티 비트를 설정한 후에 전송을 실시한다. 주컴퓨터로 전송된 데이터의 페리티를 검사하여 데이터 전송의 오류를 검출하게 되면 주컴퓨터는 PMU에 제어신호를 보내 재전송을 요구하도록 한다. 제어신호는 8비트로 설정하여 각 비트에 현재 전송중인 데이터노드의 종류와 주컴퓨터의 데이터 요구상태를 표시하도록 한다. 제어신호의 설정값은 다음과 같다. 상위 3개 비트에 전송중인 데이터노드의 종류를 구분하고 하위에 데이터 재전송 요구상태를 표시하도록 설정하였다. 현재는 4개 비트는 사용중이지 않지만 차후에 제어신호의 확장을 위해서 1바이트의 제어신호 구조를 택했다.

표 2 제어신호구조
Table 2. Structure of control signal

	MSB	6	5	4	3	2	1	LSB
정상 데이터 전송시	미 사용	사고 데이터 전송시	미 사용	사고 데이터 전송시	미 사용	재전송 요구	미 사용	

제어신호의 흐름과 PMU내의 마이크로 프로세서의 기능도는 다음과 같다.

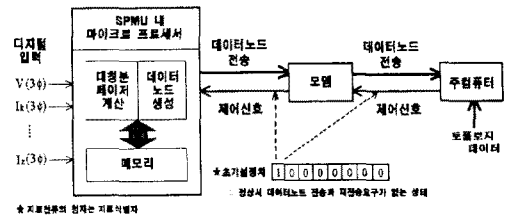


그림 2 PMU 기능도
Fig. 2 Functional diagram of PMU

4. 동기페이지 측정원리 및 모델구현

전송한 바와 같이 전력계통의 상태에 따라서 전송되는 데이터노드의 각 필드가 달리 설정되기 때문에 동기페이지측정장치는 모든 경우에 대한 정보를 계산할 필요가 있다. 따라서 동기페이지측정장치는 모든 대칭분 페이지를 계산하고 주컴퓨터의 제어신호에 따라 적절한 데이터노드를 구성한다.

4.1 페이지측정원리

페이지는 한 주기 파형을 일정한 간격으로 샘플링하여 얻어진 이산값을 통해서 이산푸리에변환으로 계산할 수 있다. 주파수가 ω 인 정현파 입력함수(식(1))에 대한 일반적인 페이지 표현은 식(2)와 같다.

$$x(t) = \sqrt{2}X \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

$$X = X e^{j\theta} = X \cos \theta + j \sin \theta \quad (2)$$

입력함수에 대한 기본 주파수의 한 주기내의 샘플수를 N이라 가정하고, 이산 푸리에변환(Discrete Fourier Transform)의 기본 주파수 성분은 식(3)과 같다.

$$X_1 = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-j\frac{2\pi}{N}k} \quad (3)$$

식(3)의 DFT식과 기존의 페이지 표현과의 관계는 식(4)와 같이 유도할 수 있다.

$$X = X e^{j\theta} = X \cos \theta + j X \sin \theta = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-j\frac{2\pi}{N}k} e^{j\frac{\pi}{2}} \quad (4)$$

여기서 X는 페이지이고, x_k 는 샘플링된 값이다. 샘플을 취할 때

마다 바로 페이지를 계산하기 위해서 식(4)를 반복적인 형태로 변환한다. 단, 데이터 윈도우가 이동하면서 페이지가 샘플링 각으로 위상 천이하지 않도록 식을 유도하면 다음 식(5)와 같다.

$$X^{(r)} = X^{(r-1)} + \frac{\sqrt{2}}{N} (x_{N+r} - x_r) e^{-j\frac{2\pi}{N}(r-1)} e^{j\frac{\pi}{2}} \quad (5)$$

식(5)는 데이터 윈도우가 움직이면서 추가되는 샘플과 삭제되는 샘플 사이의 차이에 의해서, 새로운 페이지는 이전의 페이지 데이터를 수렴함으로써 결정됨을 보이고 있다.

4.2 대칭성분 계산

3상 신호에 대한 실시간 대칭성분의 계산은 720Hz의 샘플링율 (sampling rate)이 가장 유리하다는 것이 알려져 있으므로(2), 주기당 12샘플을 취하여 각 상의 페이지를 계산하고 3상 대칭분을 계산한다. 대칭분 전압페이지는 식(6)과 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 V_0 , V_1 , V_2 는 각각 영상분, 정상분, 역상분 전압페이지이고, V_a , V_b , V_c 는 각상의 전압페이지이며, a 는 정방향 회전 연산자이다.

각 상의 전압페이지와 회전연산자를 식(6)에 대입하여 대칭분 전압페이지를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_1^{(r)} &= \frac{1}{3} (V_a^{(r)} + aV_b^{(r)} + a^2V_c^{(r)}) \\ &= \frac{1}{3} (V_a^{(r-1)} + aV_b^{(r-1)} + a^2V_c^{(r-1)}) + V_{offset1}^{(r)} \end{aligned} \quad (7-1)$$

$$\begin{aligned} V_{offset1}^{(r)} &= \frac{1}{3} \frac{\sqrt{2}}{N} e^{j\frac{\pi}{2}} [(v_{aN+r} - v_{a+r})e^{-j\frac{2\pi}{N}(r-1)} + \\ &\quad (v_{bN+r} - v_{b+r})e^{-j\frac{2\pi}{N}(r+5-1)} + \\ &\quad (v_{cN+r} - v_{c+r})e^{-j\frac{2\pi}{N}(r+9-1)}] \end{aligned} \quad (7-2)$$

$$\begin{aligned} V_2^{(r)} &= \frac{1}{3} (V_a^{(r)} + a^2V_b^{(r)} + aV_c^{(r)}) \\ &= \frac{1}{3} (V_a^{(r-1)} + a^2V_b^{(r-1)} + aV_c^{(r-1)}) + V_{offset2}^{(r)} \end{aligned} \quad (8-1)$$

$$\begin{aligned} V_{offset2}^{(r)} &= \frac{1}{3} \frac{\sqrt{2}}{N} e^{j\frac{\pi}{2}} [(v_{aN+r} - v_{a+r})e^{-j\frac{2\pi}{N}(r-1)} + \\ &\quad (v_{bN+r} - v_{b+r})e^{-j\frac{2\pi}{N}(r+9-1)} + \\ &\quad (v_{cN+r} - v_{c+r})e^{-j\frac{2\pi}{N}(r+5-1)}] \end{aligned} \quad (8-2)$$

$$\begin{aligned} V_0^{(r)} &= \frac{1}{3} (V_a^{(r)} + V_b^{(r)} + V_c^{(r)}) \\ &= \frac{1}{3} (V_a^{(r-1)} + V_b^{(r-1)} + V_c^{(r-1)}) + V_{offset0}^{(r)} \end{aligned} \quad (9-1)$$

$$\begin{aligned} V_{offset0}^{(r)} &= \frac{1}{3} \frac{\sqrt{2}}{N} e^{j\frac{\pi}{2}} [(v_{aN+r} - v_{a+r})e^{-j\frac{2\pi}{N}(r-1)} + \\ &\quad (v_{bN+r} - v_{b+r})e^{-j\frac{2\pi}{N}(r-1)} + \\ &\quad (v_{cN+r} - v_{c+r})e^{-j\frac{2\pi}{N}(r-1)}] \end{aligned} \quad (9-2)$$

이를 정리하면

$$V_1^{(r)} = V_1^{(r-1)} + V_{offset1}^{(r)} \quad (10)$$

$$V_2^{(r)} = V_2^{(r-1)} + V_{offset2}^{(r)} \quad (11)$$

$$V_0^{(r)} = V_0^{(r-1)} + V_{offset0}^{(r)} \quad (12)$$

여기서 $V_{offset1}^{(r)}$, $V_{offset2}^{(r)}$, $V_{offset0}^{(r)}$ 는 각각 식(7-2), (8-2), (9-2)와 동일하다.

대칭분 전압페이지는 식(10)~(12)를 통해서 매 샘플링순간에 반복적인 절차에 의해서 계산될 수 있다. 유사한 방법으로 대칭분 전류페이지도 계산할 수 있다.

4.3 동기페이지 측정장치 모델 개발

EMTP/Models는 기존 EMTP/TACS(Transient Analysis of Control

System)의 제약조건을 보완한 시간영역모의를 위한 프로그래머로서 복잡한 시스템에 대한 동적거동(dynamic behavior)을 표현하는 데 유용한 도구이다(8). 본 논문에서는 EMTP/Models를 이용하여 EMTP내에서 동기페이지 측정장치를 모의할 수 있는 모델을 개발하였다.

대칭분 페이지는 식(10)~(12)를 통해서 매 샘플링 순간 반복적인 절차에 의해서 계산될 수 있다. EMTP/Models로 구현한 동기페이지 계산을 위한 흐름도는 아래 그림과 같다.

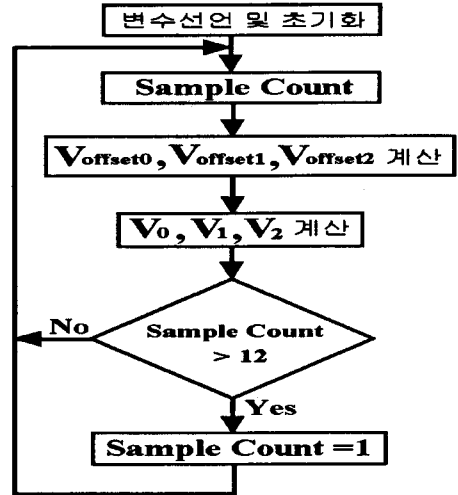


그림 3 대칭성분 계산 흐름도
Fig. 3 Flowchart for the calculation of symmetrical component

5. 사례연구

개발된 동기페이지 측정장치의 계산성능을 분석하기 위해서 본 논문에서는 1기 발전기와 무한대 모선으로 구성된 모델계통을 선정하여 다양한 계통사고에 대한 동기페이지 측정장치의 페이지 계산 성능을 평가하였다.

5.1 모델계통 및 사고 선정

본 논문에서 구현한 동기페이지 측정장치의 성능을 평가하기 위해서 모델계통으로 1기 발전기와 1기 무한대 모선으로 이루어진 2모선 계통을 선정하고, 모델계통의 양쪽 모선에 PMU를 설치하여 각 모선의 대칭분 페이지를 계산하였다.

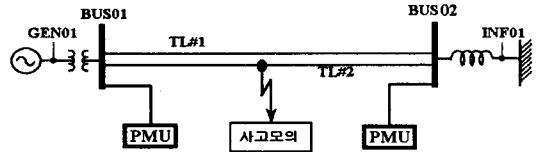


그림 4 모델계통의 단선도
Fig. 4 One line diagram of the model system

모델계통의 다양한 계통상황을 모의하기 위해서 상정사고를 가정하였다. 모의사고는 송전선로-TL#2 중압에서 일시적으로 발생하는 사고(3cycle동안 지속되는 사고)를 가정하였다. 사고모의는 1선지락사고, 선간단락사고, 3상단락사고, 3상지락사고에 대해서 수행하였고, 선간단락과 3상지락이 순차적으로 발생하는 경우에 대해서도 모의하였다(표3 참조). 모의사고를 통해서 동기페이지 측정장치의 대칭분페이지 계산의 정확성을 검토하였다.

표 3 모델계통에 대한 사고시나리오
Table 3 Scenarios for the model system

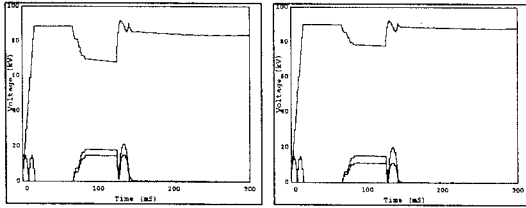
모의경우	사고 시나리오
CASE 1	TL#2의 중압점에서 A상 일시적인 1선지락고장
CASE 2	TL#2의 중압점에서 A상과 B상의 선간단락고장
CASE 3	TL#2의 중압점에서 A,B,C상 3상지락고장
CASE 4	TL#2의 중압점에서 A,B,C상 3상단락고장
CASE 5	TL#2의 중압점에서 3상단락과 3상지락이 순차적으로 발생

5.2 모델계통에 대한 사고모의 결과

모의결과는 각 모선에 대한 대칭분 전압페이즈와 두 모선간의 정상분 전압페이즈의 크기와 위상을 비교하였다.

5.2.1 CASE 1 : 1선지락사고

선로TL#2의 중앙에서 1선지락사고가 3cycle동안 발생한 경우의 결과는 그림 5와 6과 같다.

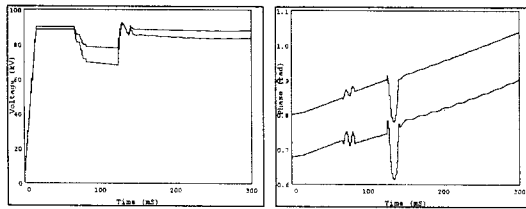


(a) BUS01

(b) BUS02

그림 5 각 PMU의 대칭분 전압페이즈

Fig. 5 PMU positive sequence voltage phasor on each bus



(a) Magnitude of phasor

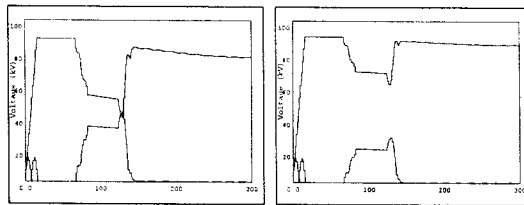
(b) Phase angle of phasor

그림 6 각 모선 페이즈의 차이비교

Fig. 6 Phasor difference between BUS01 and BUS02

5.2.2 CASE 3 - 단락사고 모의

선로TL#2의 A상과 B상에서 선간단락사고 발생결과는 그림 7과 8과 같다.

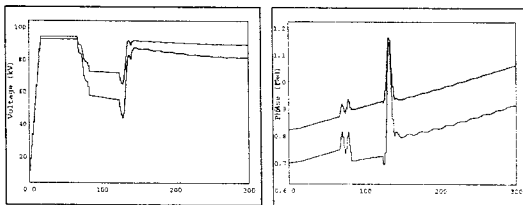


(a) BUS01

(b) BUS02

그림 7 각 PMU의 대칭분 전압페이즈

Fig. 7 PMU positive sequence voltage phasor on each bus



(c) Magnitude of phasor

(d) Phase angle of phasor

그림 8 각 모선 페이즈의 차이비교

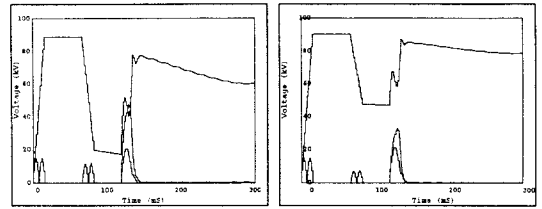
Fig. 8 Phasor difference between BUS01 and BUS02

단락사고의 모의는 정상분과 역상분 페이즈만 나타나고 영상분 페이즈는 나타나지 않았으며, 무한대 모선쪽의 페이즈는 사고 이후에도 크게 변화하지 않았지만 발전기가 연결된 모선의 정상분 페이즈의 크

기는 사고시와 사고이후에 그 값이 크게 변화하고 있음을 관찰할 수 있다.

5.2.3 CASE 3 - 3상지락사고 모의

선로TL#2의 중앙에서 3상지락사고가 3cycle동안 발생한 경우의 결과는 그림 9와 10과 같다.

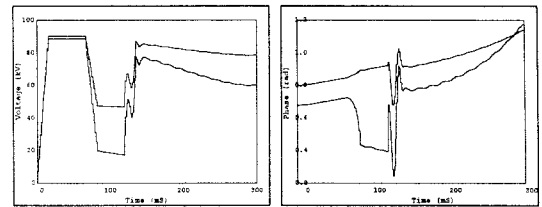


(a) BUS01

(b) BUS02

그림 9 각 PMU의 대칭분 전압페이즈

Fig. 9 PMU positive sequence voltage phasor on each bus



(c) Magnitude of phasor

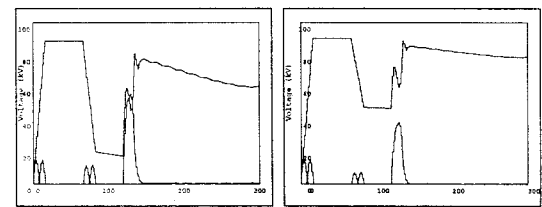
(d) Phase angle of phasor

그림 10 각 모선 페이즈의 차이비교

Fig. 10 Phasor difference between BUS01 and BUS02

3상 지락사고시에는 정상분 페이즈만 나타나고, 역상분과 영상분은 나타나지 않았다. 초기 샘플링특성과 사고시, 사고제거시에 계통의 상태가 변화하는 과도기에 대해서는 계통상태를 표현하는 샘플 개수의 부족으로 역상과 영상분이 나타나지만 한 주기가 지난 후에는 바로 소멸됨을 알 수 있다.

5.2.4 CASE 4 - 3상단락사고 모의

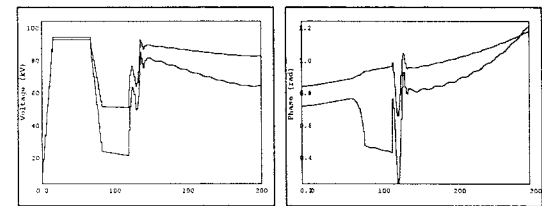


(a) BUS01

(b) BUS02

그림 11 각 PMU의 대칭분 전압페이즈

Fig. 11 PMU positive sequence voltage phasor on each bus



(c) Magnitude of phasor

(d) Phase angle of phasor

그림 12 각 모선 페이즈의 차이비교

Fig. 12 Phasor difference between BUS01 and BUS02

5.2.5 CASE 5 - 복합사고 모의

모의시작 후 4cycle만에 선로TL#2의 중압에서 3상단락사고가 발생하여 3cycle동안 지속된 후 소멸하고, 다시 3cycle후 3상지락사고가 동일지점에서 발생하여 3cycle동안 지속되는 경우를 모의하여 페이저 계산의 결과를 그림 13와 14에 제시하였다.

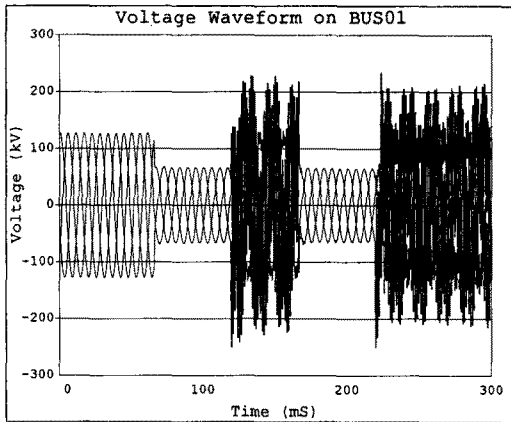


그림 13 BUS01모선의 전압파형
Fig. 13 Voltage Waveform on BUS01

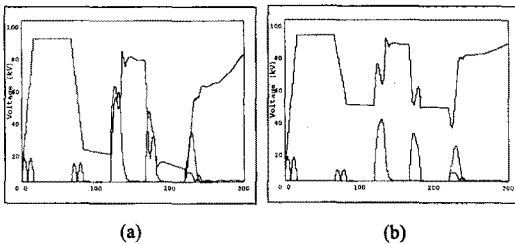


그림 14 각 PMU의 대칭분 전압페이저
Fig. 14 PMU positive sequence voltage phasor on each bus

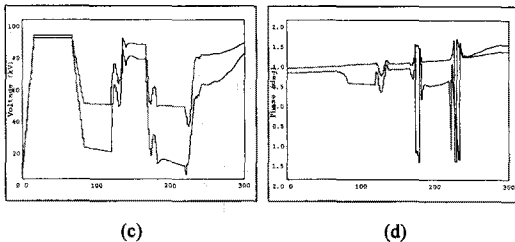


그림 15 각 모선 페이저의 차이비교
Fig. 15 Phasor difference between BUS01 and BUS02

5.3 사례연구 고찰

본 논문에서는 5가지 형태의 사고에 대한 동기페이저측정장치의 대칭분 페이저 계산성능을 분석하였다. 사례연구 결과에서 제시된 바와 같이 사고형태에 따른 합당한 대칭성분이 나타나고 있음을 관찰할 수 있다. 과도상태 동안 즉, 12샘플을 취득할 때까지는 대칭성분이 과도기적인 현상을 나타내지만 한 주기 후에는 정상적인 대칭성분 값을 제시하고 있으며, 페이저가 샘플링각 만큼 회전하지도 않는다는 것을 알 수 있었다. 복합사고 발생모의를 통해서 계통의 상태의 변화에 따른 페이저 계산성능은 1주기 이내에 정확한 페이저 값을 제시하고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 동기페이저 측정장치에서 계산된 페이저는 일련의 계전기 신호로도 충분히 활용 가능하며, 주컴퓨터에서 사고분석을 실시한 이후에 바로 제어신호로써 충분히 활용될 수 있다.

6. 결 론

본 논문은 전력계통의 공급신뢰도를 증진시키기 위한 실시간 전역 감시·제어시스템을 개발하기 위해 시스템 요구조건(Requirements)을 설정하기 위한 기반연구로 수행되었다. PMU와 주컴퓨터사이의 데이터 전송형태를 정의함으로써, PMU의 소프트웨어적 계산기능을 설정하였고, 이를 EMTP/Models를 이용하여 실제 구현하였다. 모델은 GPS를 시각원으로 사용하는 동기페이저측정장치의 대칭성분 계산성능에 역점을 두어 개발하였으며, 각종 계통사고에 대한 모의시험을 수행하여 모델의 타당성을 검토하였다.

본 논문에서 개발한 PMU의 대칭성분 계산 알고리즘과 데이터 전송을 위한 전송데이터 형식은 현재 개발중인 전력계통 실시간 전역감시·제어시스템에 직접 활용되고 있으며, 본 논문에서 제시한 PMU의 소프트웨어 요구조건은 하드웨어의 입력단자(Channel)의 제한으로 가증될 수 있기 때문에 지료가 많은 모선에 PMU가 시설된 경우에 대비해 소프트웨어와 하드웨어 요구조건 사이의 적절한 절충이 요구되므로 이에 대한 연구가 모델의 데이터 전송속도를 고려하여 수행되어야 할 것이다.

(참 고 문 헌)

- (1) P.Bonomi, "Phase Angle Measurements with synchronized clocks-principle and applications", Vol. PAS-100, No.12, December 1981
- (2) A.G. Phadke, J.S. Thorp, M.G. Adamiak, "A New Measurement Technique for Tracking Voltage Phasors, Local System Frequency, and Rate of change of frequency", IEEE Trans., Vol. PAS-102, No. 5, 1983, pp.1025~1038
- (3) A.G. Phadke, "Synchronized Phasor Measurements in power systems", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 6, No. 2, April 1993, pp.10~15
- (4) R.J Murphy, "Phasor Measurement instruments", Precise Measurements Conference, October 27-29, 1993
- (5) R.J Murphy, "Power system disturbance monitoring", 1994 Western Protective Relay Conference
- (6) R.J Murphy, R.O.Burnett, Jr., "Phasor Measurement Hardware and Application", 1994 GA Tech Protective Relaying Conference
- (7) W.Parkinson, "Global Positioning System: Theory and Applications Vol. I, II, AIAA, 1996
- (8) Users Guide to Models in ATP, April 1996, Laurent Dubé