

PMU를 이용한 실시간 발전기 동요 예측

조기선* · 김희철 · 이기송 · 신종린
건국대학교 전기공학과

A Real-Time Generator Swing Prediction using Phasor Measurement Units

Ki-Seon Cho* · Hoi-Cheol Kim · Ki-Song Lee · Joong-Rin Shin
Dept. of Electrical Eng., Konkuk University
jrshin@kkucc.konkuk.ac.kr

Abstract - This paper investigated the real-time generator swing prediction by some researchers. And the first swing stability assessment based on EAC(Equal-Area Criterion) by using phasor measurement unit is proposed. Also we proposed the multi-swing prediction techniques, which is to estimate system parameters by using least square method / extrapolation with phasor measurement units. And the multi-swing prediction is performed with the estimated parameters. Future works are necessary to verify the proposed approaches in this paper.

Keywords: Phasor Measurement Unit, real-time generator swing prediction, loss of synchronism, Equal-Area Criterion

1. 서 론

최근 전력산업구조개편 관련법안이 의결 공포됨에 따라 현재 우리나라의 전력산업은 단일 독점체제에서 분할 경쟁체제로 이행이 진행되고 있다. 경쟁적 전력시장체제하에서 전력에너지의 안정적 공급을 보장하기 위하여 무엇보다 중요한 것은 전력계통의 운용 및 제어의 정밀성 확보이다.

경쟁적 전력시장 환경하에서 제어주체의 다변화, 부하 대 송전선비 성장률의 불균형, 그리고 시장 참여자간의 이윤극대화를 목표로 한 기업 경영전략의 전환은 우리 나라 전체 전력계통의 운용을 안정운전 단계에 근접한 상황에 이르게 할 개연성을 증가시키고 있다. 따라서, 고속 과도안정도해석(transient stability analysis)은 경쟁적 전력시장 체제하에서 전력계통의 계획, 운용 및 제어의 중요한 역할을 담당할 것이며, 고속의 정밀한 과도 안정도 해석은 경쟁적 전력시장 체제하에서 전력수요 대 설비 성장률의 불균형 해소 및 시장 참여자 각각의 추구 목표를 동시에 달성할 수 있는 새로운 형태의 감시제어 시스템 구축의 공간이 될 것이다.

최근 GPS(Global Positioning System)의 시각정보를 활용한 PMU(Phasor Measurement Unit)에 대한 연구가 활발히 진행 [1,2,9]되고 있으며, GPS기반 PMU는 다수의 원격지 측정점에 대한 측정시각의 동시성을 높은 정밀도를 보장하므로 측정치간의 비교 분석을 요하는 활용분야에서 동시성에 대한 중요한 전제조건을 제시할 수 있어, 향후 PMU 측정치의 활용방안에 대한 연구가 꾸준히 이루어질 것이며, 기존 전력계통의 성능 향상의 일익을 담당하게 될 것으로 사료된다. PMU는 과도 외란에 대해서 실시간으로 계통의 상태를 추적할 수 있기 때문에 정밀 예방 제어의 기초자료를 제공할 수 있다. 최근 들어, PMU의 실시간 측정치를 이용한 동요예측과 각종 계전기의 초기설정치의 선정에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 PMU의 실시간 측정데이터를 이용하여 고려 대상 발전기의 동요를 예측하는 기존의 연구결과들을 조사하고 새로운 접근 방법을 모색하고자 한다.

2. 연구 동향

본 논문에서는 PMU의 실시간 측정데이터를 이용하여 고려 대상 발전기의 동요를 예측하는 새로운 접근법을 모색하기 위해서 먼저 기존 발전기 동요예측법의 접근방법과 장단점 및 성능개선의 여지에 대해서 검토하였다.

Ken Yangihashi(3) 등은 다수 발전기들 사이의 동요현상을 2기 발전기 등가모델로 등가화하고, 모델계통의 파라미터를 고려 대상 발전기의 출력단에서 측정된 데이터를 활용하여 추정하는 기법을 제시하였다. 고려대상 발전기의 파라미터는 사양으로 주어지고, 주 계통을 가상의 발전기로 모델링하고 가상발전기의 파라미터인 과도 리액턴스, 판성계수, 그리고 계동계수는 동요 중에 실측한 데이터를 이용하여 실시간으로 추정하고, 추정된 물리량을 기초로 동요방정식을 풀어, 300ms 이후의 동요를 예측함으로써 과도안정도 향상을 위한 발전기 제어시스템을 제시한 바 있다. 이 논문에서는 대상발전기의 출력단의 물리량만을 이용한 예측이라는 관점에서 성능향상의 여지가 다분하다고 할 수 있다. 다수의 PMU를 계통의 적정 위치에 시설하여 실시간으로 동기 측정된 데이터를 취득하여 동일한 예측법 및 발전기 제어시스템에 도입할 경우, 상당한 성능향상이 기대된다. 실제 동요의 동요주기를 고려하여 측정구간을 300ms로, 예측구간을 200ms로 하여 다수의 파라미터를 추정기법을 통해 도출하고 있다. 측정치로는 사고소거 후 1초간의 측정치를 기초자료로 활용하고 있기 때문에 1.2초 후에 라야 비로소 대상발전기의 동요를 예측할 수 있다.

M.Takahashi(4)는 양수발전소내의 개별 발전기의 동기 탈조 방지를 위한 고속 안정화기를 개발하면서 발전기의 동요 예측에 관한 기본적인 방향을 설정한 바 있다. 대상 발전소의 모선에서 측정된 물리량(전력, 전류, 전압)과 주 계통의 기준 발전기의 측정 물리량을 이용하여 발전기의 동태를 예측하고, 이를 이용하여 동기 탈조를 판정하여 대상발전기의 일부를 차단하는 발전기 안정화시스템을 제시하였다. 매 시간 간격의 발전기의 출력력을 이용하여 각속도와 위상을 3개 데이터 쌍에 대해 외삽(extrapolation)하여 적합(fitting)하는 방법을 사용하였다. 개별 발전기와 기준 발전기에 대해 개별적인 적합 과정을 다양한 계통조건에 대해서 모의하여, 임계값을 설정함으로써, 이를 이용하여 동기 탈조를 예측하는 방법이다. 이러한 접근방법은 근본적으로 계통의 동요주기가 1-2초라고 할 때, 측정시각의 동시성을 유지하지 못함으로써 발생하는 오차는 이론적인 접근에서는 가정을 통해서 문제가 없다는 치더라도 실제 시스템 구성 시에는 측정치의 동기오차가 증폭되어 나타날 수 있음을 주의해야 할 것이다. 따라서, 황고문헌(4)에 제시된 발전기 동요추정이론도 PMU를 대상 발전기와 기준 발전기에 시설하여 측정시각의 동기성을 고 정밀도로 유지함으로써, 시스템의 성능향상을 기대할 수 있겠다.

Bretas(5)는 적응시계열계수(adaptive time series coefficient)를 이용하여 전력계통의 과도 양태를 실시간으로 예측하는 접근방법을 제시하였다. 발전기의 동요가 시작된 후, 일정 시간 후 발전기의 동요를 예측하기 위해서 2차 자기회귀모델(autoregressive model)을 발전기의 위상각에 적합시켰다. 모델의 파라미터는 PMU로 측정된 데이터를 이용하여 추정하였다. 또한 적합모델을 도출하기 위해서 다양한 파라미터 추정 시나리오와 표본율(sampling rate)에 대한 사례연구를 수행하였다. Bretas는 사례연구를 통해서, 파라미터를 1회 추정한 경우에는 표본율과는 거의 무관하게 해의 안정성 문제가 심각하게 발생되며, 파라미터의 추정빈도와 표본율에 대한 해의 안정성 문제에 대한 중요한 결론을 도출하였다. 결국, PMU를 통해서 발전기의 동요예측을 수행하는 경우에 있어서 몇 개의 data window에 대해서 미지 파라미터를 추정할 것인지에 대한 파라미터의 추정빈도와 사용할 데이터의 표본율에 대한 선행연구가 요구된다는 결론을 얻을 수 있다.

Chih-Wen Liu[6,7]는 동기페이저 측정치를 활용하여 실시간 과도안정도 동요를 예측하기 위해서 새로운 FNN(Fuzzy Neural Network)의 활용방안을 제안하였다. 제안한 뉴로퍼저 접근방법을 통해서 오프라인으로 학습시키고, 모델의 해를 해석적으로 도출하는 것보다 훨씬 빠른 계산성능으로 향후 동태를 온라인으로 예측하는 데 사용하였다. 4cycle당 3점에서 위상 데이터를 취득하고, 2개의 각속도와 각가속도를 전향차분식으로 근사하여 도출한 후, 이를 학습데이터로써 학습하여, 실제 온라인으로 계통의 동요를 예측하는 방법을 제시하였다. Liu는 PMU를 활용하는 데 있어서, 중앙제어센터로의 데이터 전송시간을 고려하여 데이터는 4cycle당 전송되는 것으로 문제를 설정하였다. 따라서, 데이터 전송지연시간을 고려할 경우에는 현재보다 설정된 cycle 만큼 뒤진 데이터를 이용하여 동요를 예측하게 된다는 것이다. 결국, 데이터 전송지연시간으로 인하여 PMU에서 실측한 데이터를 실시간으로 바로 사용하는 데는 제약이 있으며, 이를 위해서는 전용 통신선을 도입하거나, 아니면 동요예측 구간의 축소가 불가피하게 된다는 것이다.

Yi-Jen Wang[8]은 PMU를 활용한 과도 불안정에 대한 제어방식을 제안하였는데, 제안에 앞서, PMU에서는 정밀하게 위상각에 대한 정보를 측정하기 때문에 이를 이용해서 현재 계통 내지는 발전기의 관성계수, 기계적 입력, 그리고 전기적 출력을 매개변수로 삼아 추정하였다. 이는 topology나 관성체의 상호관계에 대한 선형 지식 없이 실측데이터를 이용해서 추정하게 된다.

이상으로 선형 연구자들의 연구내용을 요약하면 다음과 같다. 등가 모델계통의 파라미터를 도출하기 위해서는 사고제거 후의 계통 동요 데이터가 요구되기 때문에 1과 탈조현상에 대처하는 데는 문제점이 있다. 또한 동기성이 배제된 데이터의 비교분석은 오차를 유발할 수 있기 때문에, 일차적으로는 주 계통에 대해서 대상발전기만의 물리량을 통해서 동요예측을 수행하는 것이 합당할 것으로 사료된다. 정밀한 동요예측을 위해서는 파라미터의 추정빈도와 표본용을 적절히 설정해야 한다는 것과 PMU의 데이터 전송시간을 고려하여 실제적인 제어 및 예측이 되도록 하여야 한다는 결론을 도출할 수 있겠다. 이에 본 논문에서는 선형 연구자들의 문제점 및 장점들을 적절히 고려하고, PMU를 이용한 1과 안정도 판정과 N과 동요예측에 대한 접근방법을 제시한다.

3. PMU를 이용한 발전기 탈조 및 동요 예측

모선에 시설된 PMU는 해당 모선의 전압페이저와 모든 연결선로의 전류페이저를 절대 위상 기준으로 측정하게 된다. PMU에서 실측하게 되는 페이저는 DFT기반 알고리즘(9)을 통해서 구현되므로 주로 12 sample 데이터를 취득하여 현재의 정확한 상태벡터(페이저)를 도출한다. 그림 1은 대상 발전기의 모선에 PMU를 시설한 단순계통을 보이고 있다.

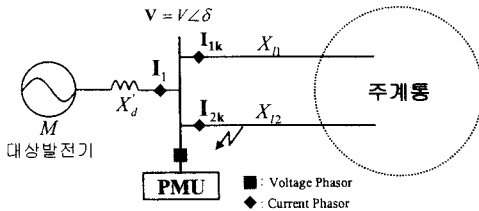


그림 1 PMU가 시설된 표본 계통
Fig. 1 The sample system with PMU

본 논문에서는 이러한 PMU를 이용한 1과 안정도 판정법을 제시하고, 안정한 경우에 한하여 N과 동요 예측을 제시하였다. 또한 계통의 계통계수를 고려한 보다 실제계에 가까운 동요를 예측하기 위해서 계통계수를 추정하였다. 본 논문의 기본적인 접근방법은 PMU의 상태벡터 실측 데이터를 활용하여 광범위한 동요 예측 및 탈조 예측을 위한 접근방법을 모색하고자 한다. 먼저, 본 논문에서 1과 및 N과 탈조에 대한 탈조예측 및 동요 예측은 기본적으로 계통에서 실측한 상태벡터의 데이터량이 부족한 시간구간에서는 등면적법(Equal-

Area Criterion, EAC)을 주로 사용하고 1주기 이상의 동요구간이 흐른 후에는 충분한 데이터가 확보되었다고 보고 PMU가 실측한 상태벡터 데이터를 이용하여 추정하는 방법을 사용하였다.

그림 2는 본 논문에서 논의하고자 하는 동요예측을 구간별로 선정한 예를 제시한 것이다. 고려 대상 발전기의 인근에서 발생된 과도 외란에 대해서 동요 1주기까지의 탈조 예측은 등면적법과 PMU에서 실측한 데이터를 활용하여 수행한다. 또한 동요의 2주기가상인 곳에서는 PMU에서 실측한 데이터를 이용하여 동요 예측을 수행하였다. 본 논문에서 외란은 사고발생 4cycle 후에 사고회선을 제거함으로써 제거된다고 가정한다. PMU의 실측데이터 활용구간은 사고제거 이후부터 가능하며, 2cycle 당 데이터를 전송하도록 하여 데이터의 전송지연시간을 고려하도록 하였다.

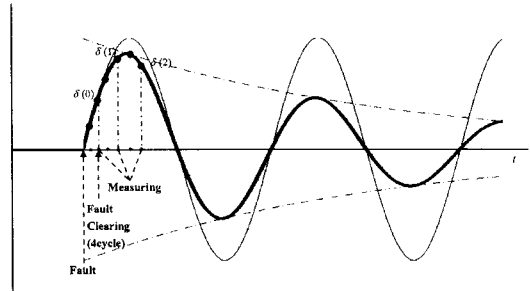


그림 2 사고 및 측정 구간 시나리오
Fig. 2 The scenario for fault and measuring interval

3.1 1과 안정도 판정

1과 탈조 현상은 PMU의 실측 데이터와 EAC를 이용하여 도출하였다. 그림 1에서, 대상발전기에서 주계통 측으로 유입되는 유효전력 P는 식(1)과 같다.

$$P = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \delta_{12} \quad (1)$$

여기서, E_1 : 대상발전기의 내부전압(internal voltage)
 E_2 : 주계통측의 가상발전기내부전압(internal voltage)
 X : 대상발전기와 주계통 간의 등가 리액턴스

대상발전기의 모선에 시설된 PMU는 전압페이저와 모든 연결선로의 전류페이저를 측정한다. 따라서 대상발전기의 내부전압은 식(2)를 통해서 도출할 수 있다.

$$E_1 = V - I_1 \times jX_d \quad (2)$$

여기서, 사고발생 전의 대상발전기에 관련하여 가지값인 물리량을 보면, E_1 , X , δ_{12} , P 등이다. 즉, 식(1)에서 미지수는 단지 E_2 만이 남게된다. 여기서, E_2 는 주계통을 가상의 발전기로 고려할 때의 내부전압이며, 이때, X 는 대상발전기의 과도 리액턴스와 대상발전기 모선과 주계통과의 연계선로의 합성 리액턴스로 PMU의 실측 상태벡터 데이터를 이용해서 직접 도출할 수 있고, 계통의 topology 사양의 가지값을 활용할 수도 있다. 본 논문에서는 선로의 컨덕턴스는 무시하고 서셉턴스만을 고려하였다. 따라서, 사고전의 운전상태에 대한 전력-위상곡선을 그림 3과 같이 유도할 수 있다. 사고 발생 동안과 사고 제거 후의 임피던스 변화를 유도하여 나머지 고장 동안과 고장 제거후의 전력-위상곡선도 유도할 수 있겠다. 차단기의 CCT (critical clearing time-4cycle)가 설정되어 있으면, 현재 발생된 사고에 대해 PMU로 실측한 데이터를 이용하여 1과 안정도 판정이 수행될 수 있다.

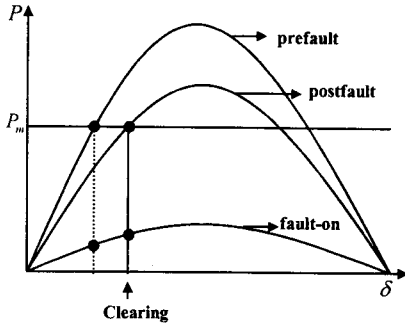


그림 3 전력-위상 곡선
Fig. 3 Power-angle curve

3.2 N파 동요 예측

그림 2에서 보인 바와 같이 사고제거시간은 사고발생 후 4cycle로 설정하고 PMU의 실측 데이터는 데이터의 전송지연시간을 고려하여 매 2cycle마다 계량하는 것으로 가정하였다. 1기 무한대 포선(OMIB)계통에 대한 동요방정식을 위상중심(COA)에 대해서 표현하면 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega \\ \omega &= a_0 + a_1 \cos(\delta) - a_2 \sin(\delta) \end{aligned} \quad (3)$$

PMU에서 매 4cycle마다 현재의 위상각을 계량하므로 이를 이용하여 식(3)의 미지 파라미터 a_0, a_1, a_2 를 추정할 수 있다. 여기서, ω 는 차분근사식을 이용하여 실측된 δ 를 이용하여 유도된다.

$$\dot{\omega}(k\Delta t) = \frac{\delta((k-1)\Delta t) - 2\delta(k\Delta t) + \delta((m-1)\Delta t)}{(\Delta t)^2} \quad (4)$$

사고제거 후 8cycle 동안에 계량된 데이터 쌍은 5개이므로 3 데이터 쌍을 하나의 윈도우로 구성하고, 윈도우를 한 point씩 이동하면서 식(4)의 각가속도를 유도할 수 있다. 이 윈도우를 원하는 측정구간까지 확장함으로써, 발생하는 물리량은 윈도우의 이동 개수에 해당하는 수치벡터를 얻을 수 있다. 결국, 식(3)은 다음 식(5)와 같이 유수함수(residual function)로 표현될 수 있다.

$$e(t) = \dot{\delta}(t) - a_0 - a_1 \cos(\delta(t)) - a_2 \sin(\delta(t)) \quad (5)$$

식(5)를 미지수와 계수에 대한 벡터형태로 표현하면 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} E &= \begin{bmatrix} \dot{\delta}(\Delta t) \\ \dot{\delta}(2\Delta t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & \cos(\Delta t) & \sin(\Delta t) \\ 1 & \cos(2\Delta t) & \sin(2\Delta t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \\ E &= K - C \times A \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 오차벡터 E 를 최소로 하는 미지벡터 $A = [a_0 \ a_1 \ a_2]^T$ 를 결정하면 된다. 계수행렬 C 는 미지수의 개수에 비해서 측정치의 개수가 훨씬 많은 우결정계(over-determined system)으로 표현되었다. 따라서 바로 역행렬을 취할 수 없으므로 의사역행렬(pseudo-inverse)을 도입하여 미지벡터 A 를 도출하면 식 (7)과 같다.

$$A = (C^T C)^{-1} C^T (K - E) \quad (7)$$

식(7)을 풀어서 도출된 $A = [a_0 \ a_1 \ a_2]^T$ 를 식(3)에 대입하여 수치적분을 이용하여 동요를 예측할 수 있다.

본 논문에서 식(3)의 미지 파라미터를 추정하기 위해 최소자승법을 사용하였는데, 이 기법은 gross error에 매우 민감한 특성을 가지고 있기 때문에 bad data에 대한 대처가 요구된다.

3.2 제동을 고려한 N파 동요 예측

그림 2에 제시된 파형에서 2파 이상이 진행하기 시작하면서부터는 동요의 포락선(envelope)을 도출할 수 있다. 이 포락선은 동요의 제동계수를 의미하게 되고, 이는 곡선적합(curve fitting)합수를 사용하여 도출할 수 있다. 따라서 제동을 고려한 N파 동요예측식은 식(3)에 제동계수를 고려하여 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= \omega \\ \omega &= a_D + a_1 \cos(\delta) - a_2 \sin(\delta) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $a_D = a_0 - D\dot{\delta}$ 이고, δ 는 δ 의 전향차분근사식을 통해 서 구하게 된다.

동요 주기가 1주기 이상이 진행된 경우에는 식(3)에 의한 N파 동요 예측과 병행하여 제동계수가 고려된 동요도 동일한 데이터를 이용하여 추정하게 되고, 식(8)의 매개변수는 식(7)과 유사한 방법에 의해 도출된다.

3. 결 론

본 논문에서는 최근 연구가 활발히 진행되고 있는 PMU(Phasor Measurement Unit)를 이용하여 대상 발전기의 동요를 예측하는 방법론에 대한 선행연구자들의 연구결과를 검토하였고, 이를 종합하여 1파에서 N파까지 적용 가능한 동요예측법과 1파 안정도 판정에 관한 접근방법을 제시하였다. 향후, 실제 모델계통에 대한 사례연구를 통해서 제안한 기법들의 타당성을 검토하겠다.

[참 고 문 헌]

- [1] Ki-Seon Cho, Joong-Rin Shin, Seung-Ho Hyun, "Optimal Placement of Phasor Measurement Units with GPS Receiver", 2001 IEEE PES Winter Meeting, Columbus Ohio, Jan.28-Feb.1, 2001
- [2] D.N.Kosterev, J.Esztergalyos, and C.A.Stigers, "Feasibility Study of Using Synchronized Phasor Measurements for Generator Dropping Controls in the Colstrip System", IEEE Trans. on Power systems, Vol.13, No. 3, pp.755-761, August 1998
- [3] Ken Yanagihashi, et al., "A New Approach to Predict Swing of Generators by Using Dynamic Equivalent Model Estimated from Real-time data", T.IEE Japan, Vol.118-B, No.10, pp.1186-1193, 1998
- [4] M.Takahashi, et al., "Fast Generation Shedding Equipment Based on The Observability of Swings of Generators", IEEE Trans. on Power systems, Vol.3, No.2, pp.439-446, May 1988
- [5] N.G.Bretas and A.G.Phadke, "Real Time Instability Prediction Through Adaptive Time Series Coefficients", pp.731-736, 1998
- [6] Chih-Wen Liu, et al., "Application of a Novel Fuzzy Neural Network to Real-Time Transient Stability Swings Prediction Based on Synchronized Phasor Measurements", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.14, No. 2, pp.685-692, May 1999
- [7] Chih-Wen Liu and James S. Thorp, "New Methods for Computing Power System Dynamic Response for Real-Time Transient Stability Prediction", IEEE Trans. on Circuits and Systems, Vol. 47, No. 3, pp.324-337, March 2000
- [8] Yi-Jen Wang, Chih-Wen Liu, Len-Dar Sue, Wen-Kuang Liu, "A Remedial Control Scheme Protects Against Transient Instabilities Based on Phasor Measurement Units (PMUs) - A Case Study", IEEE PES Summer meeting, pp. 1191-1195, 2000
- [9] 조기선, 허문준, 채명석, 신중린, "GPS를 이용한 동기 페이저측정 장치의 EMIP 모델 구현", '99 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1262-1266, 1999.7.20