

전압의 주파수 변화를 이용한 동기탈조 검출 알고리즘에 관한 연구

소광훈, 허정용, 김철환
성균관대학교, 차세대전력기술연구센터

A Study on the Out-of-Step Detection Algorithm using Voltage Frequency Variation

K. H. So, J. Y. Heo, C. H. Kim
Sungkyunkwan University, NPT Center

Abstract - The protection against transient instability and consequent out-of-step condition is a major concern for the utility. The unstable system may cause serious damage to system elements such as generators and transmission lines. Therefore, out-of-step detection is essential to operate a system safely.

This paper presents the Out-of-Step detection algorithm using voltage frequency variation. The digital filters based on Discrete Fourier Transforms (DFT) to calculate the frequency of a sinusoid voltage are used, and the generator angle is estimated using the variation of the calculated voltage frequency. The proposed out-of-step algorithm is based on the assessment of a transient stability using equal area criterion. The proposed out-of-step algorithm is verified and tested by using EMTP MODELS.

1. 서 론

현재 전력산업은 지속적인 부하의 성장 및 전력산업 구조 개편에 따라, 공공성보다는 경제성에 더 비중을 두고 있다. 따라서, 개개의 설비보호에 치중할 것으로 예상되고 이는 필연적으로 전력계통의 안정도를 저해하는 요소로 작용 있기 때문에, 전력계통 전체의 안정도의 중요성은 더욱 커지고 있다. 그러나, 계통 안정도에 크게 영향을 미치는 동기탈조를 검출하기 위한 기존의 동기탈조 검출 알고리즘은 피상임피던스 영역 통과만을 고려하여 검출하고 있기 때문에, 정확한 계통을 고려한 정확한 검출이 어렵고, 또한 빠른 계통의 동요에는 정확히 검출하지 못하여 계통기가 오동작 또는 부동작하는 경우가 발생하고 이에 따라, 계통의 안정도를 더욱 악화시키는 문제점이 있었다[1]. 따라서, 계통의 과도안정도 평가를 통해, 외란이 계통에 미치는 영향을 고려하여 적절한 보호동작을 수행하는 계통의 안정도를 고려한 동기탈조 검출이 필요하게 되었다[2].

본 논문은 DFT의 신호처리를 이용하여 발전기각을 추정하여 동기탈조 검출 알고리즘을 제시하였다. 순시전압에서 DFT를 이용하여 전압 주파수를 계산하고, 전압 주파수의 변화를 이용하여 발전기 위상각을 추정하였다. 추정된 위상각을 이용하여 과도 안정도 평가방법인 등면적법을 통해 과도 안정도를 판정하여 동기탈조 검출 알고리즘을 도출하였다. 제안된 알고리즘은 기존의 알고리즘으로는 검출하기 어려운 빠른 계통의 동요에서도 정확히 동작하며, 또한 과도 안정도를 고려하므로 계통의 안정도증진에 기여할 것으로 기대한다.

2. 동기탈조(out-of-step) 현상

동기탈조 현상이란, 일반적으로 전력계통은 평형을 유

지하지만 부하변동, 계통의 고장, 스위칭 현상 등의 갑작스런 외란에 의해서 일부 시스템의 위상각이 커져 동기가 불일치되어 선로 양단의 계통 전원이 동요하는 현상을 말한다. 동기탈조 현상이 발생하는 동안의 전압, 전류는 전원의 위상차 δ 에 의해서 진동하며, 위상차 δ 의 변화정도에 따라 stable swing과 unstable swing으로 구분할 수 있다. unstable swing의 경우는 동기기가 동기탈조를 야기할 만큼 심한 전력동요(power swing)를 말하며 계통의 불안정을 초래하기 때문에 계통 전체의 안정도를 위해 미리 정해진 계통 분리 지점에서 트립이 필요하다[3].

3. 발전기 위상각 계산

3.1 양단전원계통 모델

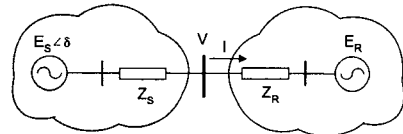


그림 1 양단전원계통 모델

계통이 그림 1과 같을 때 모선에서 측정된 전압은 다음 식 (1)과 같다.

$$V = \left(\frac{Z_R}{Z_S + Z_R} \right) E_S \angle \delta + \left(\frac{Z_S}{Z_S + Z_R} \right) E_R \quad (1)$$

식 (1)을 순시전압으로 나타내면

$$V(t) = \frac{Z_R |E_S| \cos(\omega t + \delta_s(t)) + Z_S |E_R| \cos(\omega t)}{Z_S + Z_R} \quad (2)$$

여기서, ω 는 기본주파수 60Hz를 의미하고 $\delta_s(t)$ 는 시간에 따라 변화하는 발전기 위상각이다.

DFT를 이용하여 전압의 주파수 성분을 추출하면 다음 식 (3)과 같다.

$$V_f(t) = \omega t + \delta_s(t) \quad (3)$$

식 (3)을 시간 t 에 대하여 미분하면 다음 식 (4)와 같고,

$$V_f(t)' = \omega + \frac{d\delta_s(t)}{dt} \quad (4)$$

다시, 식 (4)를 시간 t 에 대하여 미분하면 다음 식 (5)와 같다.

$$V_f(t)'' = \frac{d^2 \delta_s(t)}{dt^2} \quad (5)$$

따라서, 전압의 주파수 변화를 계산하면 발전기의 위상각 추정이 가능하다.

3.2 DFT를 이용한 주파수 추출 방법

전압 파형에 DFT를 이용하면 전압의 페이저를 계산할 수 있다. 이산 입력신호가 $v(k)$ 이고 한 주기동안의 샘플 수를 N 이라고 하면, 이 신호를 DFT변환한 식은 다음 식 (6)과 같다[5]-[7].

$$V(n) = \sum_{k=0}^{N-1} v(k) W_N^{nk} \quad (n=0,1,2,\dots,N-1) \quad (6)$$

여기서, $W_N = e^{-j(2\pi/N)}$ 이다.

$v(k)$: 전압의 샘플링 값

N : 샘플링 수

w : 기본 주파수

T : 샘플링 간격

$n=1$ 일 때, 기본파를 추출하면, 다음 식 (7)과 같다.

$$V(1) = \sum_{k=0}^{N-1} v_k \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) - j \sum_{k=0}^{N-1} v_k \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \quad (7)$$

여기서, $v_n = v[n-(N-1)+k]$ 이다.

따라서, 기본파의 주파수는 다음 식 (8)과 같이 연속적인 페이저의 변화로 구할 수 있다.

$$w = \frac{\arg[V_{k+1}] - \arg[V_k]}{T} \quad (8)$$

여기서, $\arg[V_k] = \tan^{-1}\left\{\frac{\text{Im}[V_k]}{\text{Re}[V_k]}\right\}$

4. 발전기 위상각 계산을 통한 동기탈조 검출 알고리즘

DFT를 이용한 식 (8)을 이용하여 순시전압의 주파수 성분을 계산하면 식 (4)과 같이 기본파 주파수와 발전기 상차각의 시간의 미분값이 계산된다. 다시, 식 (4)를 미분하게 되면 식 (5)가 되므로, 발전기 위상각을 계산할 수 있다.

발전기 위상각의 변화에 따른 발전기 위상각의 미분값(속도)의 변화는 다음 그림 2와 같다.

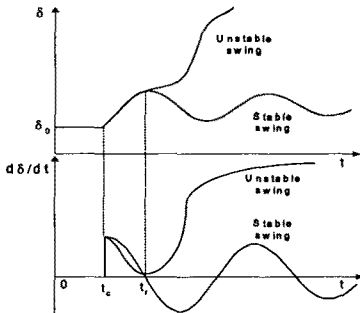


그림 2 시간에 따른 위상각 궤적

4.1 안정한 경우(stable swing)

안정한 경우에는 그림 2와 같이 사고제거(t_c)후 위상각이 증가하다가 (t_1)시점에서 다시 감소하게 된다. 이 때, 속도는 0이 되고, 가속전력 P_a , 즉 $(M d^2\delta/dt^2)$ 은 (-)의 값을 갖는다.

다음 그림 3은 안정한 경우의 전력-상차각 곡선을 나

타낸 것이다. 그림 3에서 ① - ⑤까지 위상각이 진동함에 따라, 속도와 가속전력의 궤적은 다음 그림 4와 같다. 위상각이 ① - ⑤까지 진동함에 따라 궤적은 기본 주파수(0, 120 π)를 중심으로 원형을 그리며 회전하는 것을 알 수 있다.

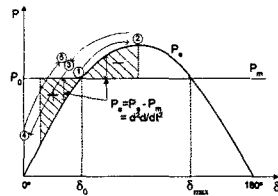


그림 3 전력-상차각 곡선(안정한 경우)

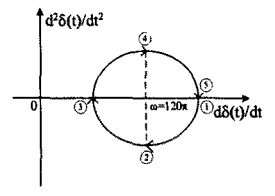


그림 4 위상각의 변화에 의한 동기탈조 검출(안정일 경우)

4.2 불안정한 경우(unstable swing)

불안정한 경우에는 그림 2와 같이 사고제거(t_c)후 전기적인 출력이 기계적 입력보다 작아지는 시점부터 위상각이 급격히 상승한다. 이 때, 속도는 0 이상이 되고, 가속전력 P_a , 즉 $(M d^2\delta/dt^2)$ 은 0의 값을 갖는다.

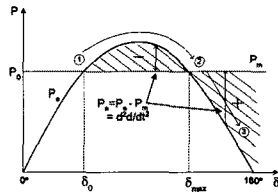


그림 5 전력-상차각 곡선(불안정한 경우)

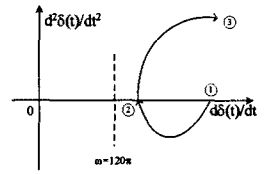


그림 6 위상각의 변화에 의한 동기탈조 검출(불안정일 경우)

그림 5는 불안정한 경우의 전력-상차각 곡선을 나타낸 것이다. 그림 5에서 ① - ③까지 위상각의 증가에 따라 속도와 가속전력의 궤적은 그림 6과 같다. 위상각이 ① - ③까지 증가함에 따라 궤적은 속도가 기본 주파수보다 크면서 가속전력이 (-)에서 (+)로 이동하는 것을 알 수 있다.

4.3 동기탈조 검출 알고리즘

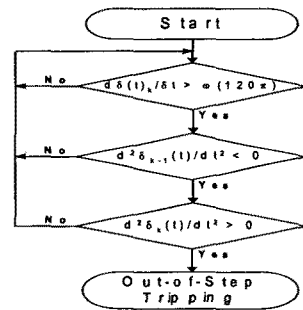


그림 7 동기탈조 검출 순서도

동기탈조의 경우는 불안정한 경우(unstable swing)로 그림 6에서의 ②에서 ③으로 바뀌는 순간을 검출하면 된다. 그림 7은 동기탈조 검출 알고리즘을 보여주고 있다.

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

5.1 시뮬레이션 방법

시뮬레이션에 사용된 계통은 다음 그림 8과 같다. 계

통 전압은 345kV이고 동기발전기 G1이 연결된 BUS1에서 BUS 2를 향하여 조류가 흐르고 BUS1에 Relay A가 연결되어 있을 때 BUS1과 BUS2 사이의 선로에서 고장을 발생시켜 일정시간 지속 후 아래쪽 선로를 차단한다. 동기 발전기 G1은 EMTP Type-59 동기기 모델과 TACS를 사용한 조속기, 여자기 모델을 사용하여 22kV 전압과 6300MVA 용량의 올진 N/P를 모델링하였다. 선로의 길이는 100km이고 기준용량은 100MVA로 계산하였다.

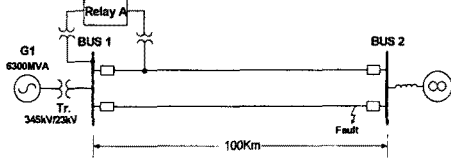


그림 8 계통 모델

계통에 동기탈조 상태를 모의하기 위해 그림 8 선로의 95%지점에 시뮬레이션 시작 2초 후에 3상고장을 발생시키고 고장지속시간을 각각 20주기, 35주기 후 고장을 제거하였다. 고장을 제거한 후 발전기 G1에 전력동요가 발생하였다. 또한, 동기발전기 G1의 초기 위상각은 20도로 설정하였다.

5.2 안정한 경우(stable swing-고장 지속시간 20주기)

고장 지속시간 20주기 후 고장을 차단했다. 발전기 위상각은 진동하지만, 안정한 경우로서 동기탈조는 발생되지 않고, 전력동요(power swing)만 발생하였다.

다음 그림 9는 실제 발전기 위상각과 계산된 발전기 위상각의 미분값 및 2계 미분값을 나타내고 있다. 계산된 발전기 위상각이 실제 발전기 각의 미분값과 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

다음 그림 10은 계산된 발전기 위상각의 궤적을 나타낸다. 앞서 살펴본 알고리즘 중 안정한 경우로서 궤적이 기본주파수(0, 120π)를 중심으로 원형을 그리는 것을 볼 수 있다.

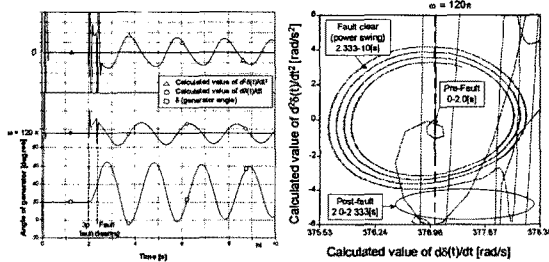


그림 9 계산된 발전기각 및 실제 발전기각의 미분값과 2계 미분값의 궤적
전기각(고장지속시간 20주기)

6.2 불안정한 경우(unstable swing-고장 지속시간 35주기)

고장 지속시간 35주기 후 고장을 차단했다. 발전기 위상각이 진동하여, 시뮬레이션 후 6초 이후에 발전기 위상각이 가속하여 동기탈조가 발생하였다.

다음 그림 11은 실제 발전기 위상각과 계산된 발전기 위상각의 미분값 및 2계 미분값을 나타내고 있다. 전기적인 출력이 기계적인 입력이 작아지는 시점에서 6초 지점에서 위상각이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

다음 그림 12는 계산된 발전기 위상각의 궤적을 나타낸다. 앞의 결과와는 다르게 불안정한 경우로서 궤적이 위상각의 미분값(속도)이 기본 주파수(120π)보다 크면서 위상각의 2계 미분값(가속전력)이 (-)에서 (+)로 이동하는 지점을 확인할 수 있다. 따라서, 시뮬레이션 시간 6초 지점에서 동기탈조를 검출할 수 있다.

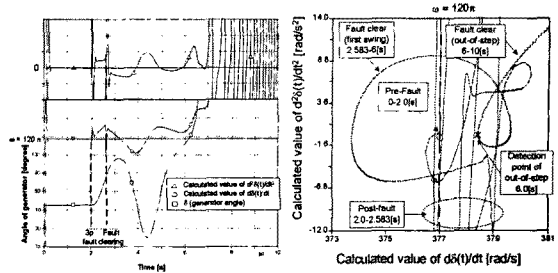


그림 11 계산된 발전기각 및 실제 발전기각의 미분값과 2계 미분값의 궤적
전기각(고장지속시간 35주기)

6. 결론

본 논문은 발전기 위상각을 계산하므로써 안정도를 고려한 동기탈조 검출 알고리즘을 제시하였다. 전압으로부터 DFT를 이용하여 주파수를 계산하고 주파수 변화로부터 발전기 위상각을 추정하였다. 또한, 위상각은 과도 안정도 평가를 위한 등면적법을 통해 과도 안정도를 판정하였다. 판정된 결과를 위해 위상각의 미분값과 위상각의 2계 미분값 궤적을 분석하여 동기탈조 검출 알고리즘을 도출하였다. 시뮬레이션 결과 발전기 위상각이 증가하여 동기가 불안정해지는 동기탈조를 정확하게 검출하였다.

이는 기존의 동기탈조 검출에 사용되는 피상임퍼던스 궤적의 통과만을 고려한 방식에 비해, 직접 발전기 위상각을 계산함으로써 과도 안정도를 고려하여 동기탈조를 검출하는 알고리즘이다. 제시된 알고리즘은 계통의 동요에 정확히 대처하고 계전기의 오동작 및 부동작을 방지함으로써 신뢰성 있는 계통운영이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다

(참고 문헌)

- [1] A. Mechraoui, D. W. P. Tomas, "A New Blocking Principle with Phase and Earth Fault Detection during Fast Power Swings for Distance Protection", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, pp. 1242-1248, July 1995.
- [2] V. Centeno, A. G. Phadke, A. Edris, J. Benton, M. Gaudi, G. Michel, "An Adaptive Out-of-Step Relay", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, pp. 61-71, Jan. 1997.
- [3] N. V. Kosterev, V.P. Yanovsky, D. N. Kosterev, "Modeling of Out-of-Step Conditions in Power System", IEEE Trans. on Power System, Vol. 11, No. 2, pp. 839-844, May 1996.
- [4] W.P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Inc., pp.829-830, 1994.
- [5] Arun G. Phadke, James S. Thorp, "Computer Relaying for Power Systems", John Wiley & Sons inc., pp.112-162, 1993.
- [6] C.H. Kim, M.H. Lee, R.K. Aggarwal, A.T. Johns, "Educational Use of EMTP MODELS for the Study of a Distance Relaying Algorithm for Protecting Transmission Lines", IEEE Trans. on Power System, Vol. 15, No. 1, pp. 9-15, Feb. 2000.
- [7] Tadeusz Lobos, Jacek Rezman, "Real-Time Determination of Power System Frequency", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 46, No. 4, pp. 877-881, August 1997.