

실시간 안정도 평가의 전력계통 적용에 관한 연구

장성익*, 박순규*, 이종주, 신명철
한국전력*, 성균관대학교

Application of Real time Transient stability assessment on the Power System

S. I. Jang, S. k. Park, J. J. Lee, M. C. Shin.
KEPCO, SKKU.

Abstract - 전력계통의 대형화된 규모와 복잡 고도화된 운영에 따라 전력계통이 높은 신뢰도를 유지할 수 있도록 계획 및 운용될 것이 요구되어, 안정도는 높은 신뢰도를 유지하면서 지속적인 공급을 하기 위한 필수 여건이다.

특히 과도 안정도는 계통운용 면에서 중요한 요소로 계통운전 정보를 실시간으로 예측하여 실 계통 과도안정도 평가를 통한 계통제어로 계통의 안정운명을 기대할 하게 된다.

1. 서 론

전력계통망의 부하 구성에서 발생하는 갑작스런 변화는 계통의 부하 중심 사이에 전력 동요를 일으키는데 전력계통의 안정한 운영을 위해서는 계통안정도를 고려한 계통보호가 요구된다.

계통동요가 발생될 때 전원과 기기의 그룹사이에 전압 위상각 δ 가 변화하고 계전기가 설치된 점에서 전압, 전류, 임피던스, 유효·무효전력의 측정되는 전기량은 위상각 δ 의 함수로 변화한다. 그러한 조건에서 거리계전기의 오동작을 방지하기 위해 계통동요 방지 장치가 자주 이용된다. 종래의 계통동요 방지 장치는 이러한 전기량의 변화로 응동되어 계전기에 나타난 동작영역에서의 지연 시간과 전류의 변화를 감시, 저항R, 전압 위상각, $V_{cos\phi}$ 등에 의해 제어 되었다.

여기서는 외란 발생시의 전력계통에서의 운전 데이터를 실시간으로 예측하여 제시하는 실시간 과도안정도 평가기법에 의해 실시간 제어 되도록 하여 신뢰성 있는 전력계통 운영이 되도록 기대한다.

2. 본 론

전력계통은 고장, 큰 부하 손실과 발생 같은 커다란 외란이 되기 쉽다. 그런 외란에 계통이 안정상태를 회복할 수 없으면 불안정하게 된다. 불안정을 방지하기 위해 여러 대책이 취해진다.

이런 수단에는 위상변환기로 전압 위상을 바꾸는 것과 직렬보상을 통해 네트워크 임피던스를 바꾸거나 동특성 제동 등이 있다. 계통안정을 증대시키려는 노력에도 불구하고 커다란 외란 후에는 불안정 해지는 계통이 존재하여 발전기, 송전선 등의 계통요소에 심각한 위험을 야기 시킨다.

초기에는 전력계통 불안정을 임피던스 변화로 판단하는 임피던스형 동기탈조 계전기를 적용하여 발전기 단자에서 보여지는 결보기 임피던스를 측정하고 계통동요가 회복가능한지 아닌지를 결정한다. 그 후에 회복 가능과 불가능을 식별하는 계전기 성능은 결보기임피던스 변화를 결합으로 개선되었다.

최근에는 측정기술의 발달과 안정도 연구의 진보로 발전기 각속도, 전압위상차 감시 등이 결정트리, 에너지 함수 같은 좀더 세밀한 기능에 기초되어 동기탈조 검출을 위해 여러 방법이 제시 되었다.

2.1 기존 동기탈조 방법

계통동요 현상과 삼상 평형 고장은 비슷한 특징을 보이기 때문에 안정한 계통동요 현상에 대해서도 거리계전기가 동작 할 수 있다. 따라서, 거리계전기의 운용에 있어서 계통동요 현상과 삼상 평형 고장을 정확하게 구별하는 것은 매우 중요한 문제이다.

일반적으로, 계통동요 현상과 삼상 평형 고장을 구별하는 방법은 다음과 같이 크게 네 가지로 나눌 수 있다.

첫째, 대칭성분 요소 중 역상분을 감시하는 방법이다. 계통상분 요소는 존재하지 않는다. 한편, 삼상 평형 고장의 경우는 일반적으로 평형 고장이기 때문에 역상분이 존재하지 않지만 삼상 고장은 1선 지락, 또는 선간 단락 고장 등에서 확대되어 발생하기 때문에, 삼상 고장이 발생하기 전에 역상분의 요소가 존재하게 된다. 따라서, 역상분 요소를 이용하여 계통 동요 현상과 삼상 평형 고장을 구별할 수 있다.

둘째, 전압, 전류의 순시 변화량을 이용하는 방법이다. 계통동요 현상 중에 전압, 전류의 크기는 주기적이며, 또한 그 변화 속도가 느리다. 이와는 반대로 삼상 평형 고장의 경우에 전압, 전류 크기의 변화는 매우 빠르며, 전압은 감소하고, 전류는 증가하게 된다. 따라서, 전압의 변화량 dv/dt , 또는 전류의 변화량 di/dt 를 이용하여 구별할 수 있다. 이렇게 전압, 전류의 순시 변화량을 이용하여 계전기에서 고장을 인식하는데 사용하기도 한다.

셋째, 계전기가 측정하는 피상 임피던스를 이용하는 방법이다. 계통동요 현상에서 계전기가 측정하는 피상 임피던스의 위상차는 계전기에 유입되는 전압, 전류의 위상차로 양단 전원 간의 위상차 δ 에 의해 영향을 받는다. 그러나 삼상 평형 고장의 경우에는 일반적으로 선로 정수에 기인하는 상수의 값을 갖는다.

넷째, 전압 위상차를 이용하는 방법이다. 선로 양단 전압의 위상차를 이용하여 동기 탈조를 검출하게 된다. 그림 1은 삼상 평형 고장과 계통동요 검출의 임피던스 수렴 특성을 나타낸 것이다. 그림으로부터 계전기가 측정하는 임피던스는 삼상 평형 고장의 경우가 계통동요 현상의 경우보다 계전기의 동작영역으로 빨리 수렴하는 것을 알 수 있다. 따라서, 계전기가 측정하는 피상 임피던스의 변화량 또는 피상 임피던스의 수렴 속도를 이용하여 구별할 수 있다.

PSB 계전기는 전력 계통 외란에 의한 계통 동요와 선로고장의 구분을 위하여 임피던스 궤적의 이동속도를 이용한다.

2.2 동기탈조 계전 방식

동기 탈조 검출을 위해 거리 계전기 보호반에 있는 PSB계전기에서는 PS요소를 사용한다. 이것은 삼상평형 고장이거나 동기탈조일 때 PS요소 영역 외에서는 거리계전기가 동작하지 않는 것처럼 PSB계전기에 동작하지 않아 PSB계전기와 거리계전기는 상호 협조가 이루어지고 있다. 그러므로 전류차동방식과 같은 보다

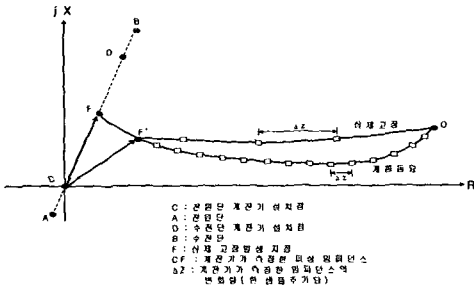


그림 1. 삼상평형 고장 계통동요시 계전기 임퍼던스 궤적

선택성 높은 내부사고 검출이 가능한 동기탈조 검출 방법이 필요하다. 전압 위상차를 이용하는 동기탈조계전기(78)는 양단의 전압만 입력하면 동작하므로 차동보호에 있어 그 선택성은 PSB계전기 보다 높다.

2.2.1 임퍼던스 궤적의 동기탈조 계전기

PSB(OST) 계전기는 임퍼던스 궤적을 감시하여 동기탈조를 검출한다. 그림 2는 동기탈조 트립로직으로 계전기의 Mode에 따라 A, B에서 PSB계전기의 OST(Out of Step)가 동작한다. Mode A일 경우에는 임퍼던스 궤적이 PS 영역을 통과하여 Z2에서 타이머 TSO2가 지나면 동기탈조로 판별하여 송전선로를 트립한다. Mode B일 경우에는 임퍼던스 궤적이 Z2를 통과하여 영역 <1>이나 <2>에서 타이머 TSO1이 지나면 동기 탈조로 판별하여 송전선로를 트립한다.

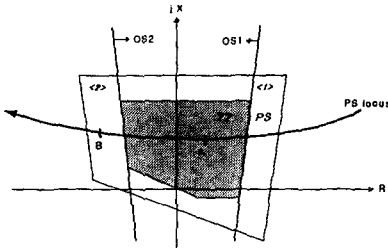


그림 2. 임퍼던스형 동기탈조 계전기

2.2.2 전압 위상차의 동기탈조 계전기

동기 탈조 계전기(78)는 그림 3과 같이 선로 양단 전압의 위상차를 이용하여 동기 탈조를 검출한다. V2 전압이 Zone α에서 Zone β로 이동하거나 Zone β에서 Zone α로 이동할 경우 동기탈조 계전기는 동작한다.

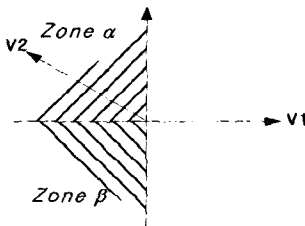


그림 3. 위상차 동기탈조 검출 특성

2.3 실시간 과도안정도 평가의 동기탈조계전

외란 발생시 계통동요 에너지는 외란이 정도에 따라 계통의 안정도에 큰 영향을 미치게 된다.

에너지 함수법에서는 외란의 마지막에 계통의 총에너지는 계통 불안정을 결정하기 위해 불안정 평형점(UEP) 제어에서 위치에너지와 비교되어 진다. 총에너지가 위치 에너지 보다 크면 계통은 불안정으로 고려되고 그렇지 않으면 안정으로 고려된다.

에너지 함수법의 수행에서 UEP제어를 찾는 것은 2기 계통을 제외하고는 시간 소요가 과재이다. 에너지 함수법의 과도한 컴퓨터 계산 요구는 대기 계통의 동기탈조 계전기 설계의 적용이 제한되었다. 에너지 함수법이 2기 계통에 적용될 때 그 방법은 온라인 불안정 검출에 이용되면 등면적기준과 동등하다.

운영되는 전력계통에서 취득되는 순시 전압, 전류 데이터에서 전력계통의 정적, 과도적 계통제도의 기하학적 특성이 계통 불안정 결정에 사용되어 계통 안정도 검토에 사용될 수 있다. 고장 후 과도 궤도의 특성이 on-line 불안정 검출의 평가기법으로서 제시 되었다. 제시된 평가기법의 계산은 발전기 각, 각속도와 그 변화율의 측정만을 요구한다. 이런 측정들은 반복 알고리즘을 이용하여 발전기 단자에서 얻어진다. 기법은 신뢰성이 있고 계산시간이 적어 실시간 과도안정도 평가에 적용될 수 있다.

외란 후 계통동요가 발생되는데 계통불안정이 발생되는 경우에 안정제도에 의한 과도안정도 평가로 불안정하게 되어지는 시점에 동기탈조 계전기를 동작하게 한다.

계통에서 계통 동특성은

$$\delta' = w \quad (1)$$

$$Mw' = P_m - D_m - P_{em} \sin \delta \quad (2)$$

δ : 동기 발전기 각, w : 동기기 각속도, D : 발전기 댐핑계수, M : 발전기 관성, P_m : 발전기 기계적 입력, P_{em} : 발전기 최대 출력

위 2)식 양변에 w 를 곱하여 tcl 에서 t ($t > tcl$)에 대해 적분하면

$$\int_{t_{cl}}^t M w dw = \int_{t_{cl}}^t (P_m - Dw - P_{em} \sin \delta) d\delta$$

$$\text{즉, } \frac{1}{2} M w^2 - P_m \delta - P_{em} \cos \delta + \int_{\delta_{cl}}^{\delta} D w d\delta = C \quad (3)$$

여기서 C는 기지의 고장제거 시간으로 상수이고

$$C = \frac{1}{2} M w_{cl}^2 - P_m \delta_{cl} - P_{em} \cos \delta_{cl}$$

에너지 함수법에서 3)식의 좌변 첫 항은 운동에너지라 불리고 둘째 두 항은 위치에너지로 불린다.

식 3)은 2)식에 설명된 계통 동특성과 같은 표현이고 계통궤도를 얻는데 사용될 수 있다. 상수 C에 의해 3)식은 안정, 불안정 궤도를 표현한다.

상수 C가 임계제거 시간에 대응한 값을 가질 때 3)식은 안정영역의 경계를 나타낸다. 고장제거 후 즉시 또는 짧은 시간 후에 안정 궤도는 고장 후 SEP에 대하여 항상 옴목하고 불안정한 궤도는 고장 후 SEP에 대하여 블록하게 된다. 이와 같은 과도 불안정도는 고장 후 궤도의 곡선검출 식별로 검출 되어진다.

모델계통에서 계통궤도와 고장 후 계통의 안정도 경계를 보인 그림을 얻을 수 있다.

그림 4에서는 고장 전, 후 계통 안정평형점(SEP)을 보였다. 계통궤도는 계통 동특성 방정식의 적분으로 얻어지고, 발전기 각속도 w 와 발전각 δ 이 그려진다.

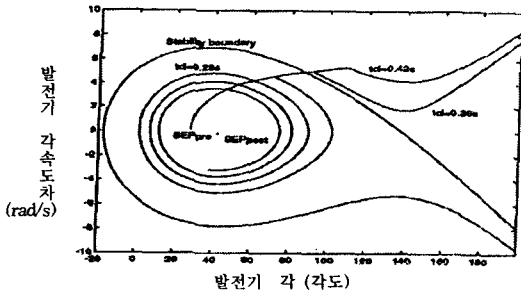


그림 4. 계통 안정경계와 3상고장에 따른 계통궤도

안정 경계에 놓인 UEP의 안정한 값으로 구성된 안정 경계는 UEP에서 시작하여 시간에 반비례 하여 동특성방정식을 적분하므로 얻어진다.

외란 마지막에 계통 상태변수 δ 와 w 가 안정경계 안쪽에 있으면 외란 후 계통 상태변수는 경계로 둘러싸인 SEP로 정착될 것이고 계통은 안정하다.

그러나 외란 종결에 경계 밖의 상태변수로 이동할 만큼 외란이 충분히 크면 계통은 SEP에 정착될 수 없고 불안하다. 분명히 계통 궤도는 다른 관점에서 설명될 수 있다.

2.4 모의모델 분석 사례



그림5. 모의 모델계통

계통 동특성 연구를 위해 1선로에 3상 단락 고장을 가정하여 $t=0.1$ 초에 고장 발생하여 $t=0.5$ 초에 고장제거되어 고장이 건전계통에서 분리되었다 가정했다.

아래 그림은 고장발생 일정 시간 후 계통의 궤적을 시간 별로 조사해보았다.

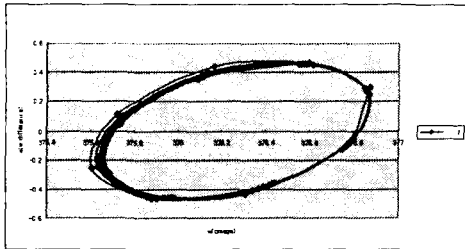


그림 6. 고장발생 전 계통궤적

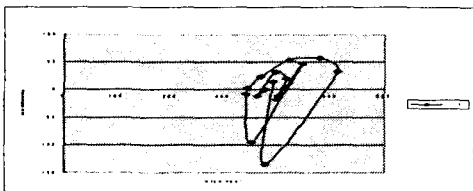


그림7. 고장발생 직후 계통궤적

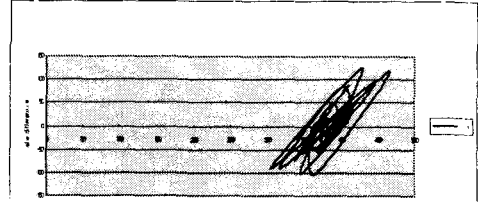


그림8. 고장동안 계통궤적

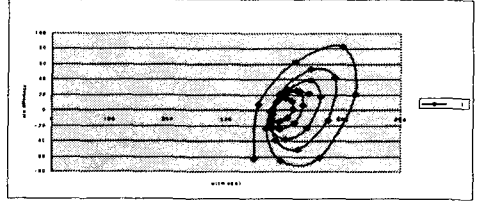


그림9. 고장제거 후 계통궤적

3. 결 론

전력계통의 구성이 복잡해지면서 계통안정도 문제도 복잡 다양한 양상을 나타내고 안정도 해석이론 및 기법에 대한 연구와 안정도를 개선하기 위한 여러 기술적인 대책이 계통계획 및 운용에 적용되어 왔다.

전력계통의 특성은 대규모, 비선형 동적특성이 있어 안정도의 수학적 표현과 단계별 수학적 분석은 많은 시간이 소요되어 실시간 제어의 요구를 만족할 수 없게 된다. 따라서 대규모 정전을 줄이기 위해 계통 분리 등의 off-line에 의해 미리 검토된 제어량에 의한 과제어 혹은 부족제어가 수행 될 수 있다.

운영되는 전력계통의 실시간 데이터 측정 및 예측으로 과도안정도 평가 후 계통을 실시간 제어하여 전력계통을 신뢰성 있고 안정하게 제어하는 방안들을 모색해 보고자 하였다.

앞으로 실계통 데이터에 적용 가능성을 검토하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Belhomme "Power System Reduction Techniques For Direct Transient Stability Methods" IEEE, Vol. 8, No. 2, May 1993, pp723-729
- [2] N. V. Kosterev, V. P. Yanovsky, D. N. Kosterev, "Modeling of Out-of-Step Conditions in Power Systems", IEEE Trans on Power Systems, Vol. 11, NO.2, May 1996
- [3] 전력연구원 "시각동기장치를 이용한 전력계통 온라인 안정성 감시, 분석 시스템 개발" 2000