

On-line 안정화 제어기법

오태규*, 김학만*, 서의석**, 김일동***, 김용학***
 한국전기연구소*, 호남대학교**, 전력연구원***

On-line Stabilizing Control Scheme for Power System

Tae Kyoo Oh*, Hak Man Kim*, Eui Suk Suh**, Il Dong Kim***, Yong Hak Kim***
 KERI*, Honam Univ.**, KEPRI***

Abstract - When large capacity generation stations that consist of several large units tend to pull out of step from main power system, stabilizing control scheme as emergency control for preventing loss of synchronism of the whole stations with the remaining system is divided into two steps that the first step is to perform on-line prediction for out-of-step and the next step is on-line calculation of the amount of generation shedding for the rest of generators to be in step when out of step is expected.

This paper presents on-line prediction scheme for out-of-step based on $P-\delta$ curve estimation using real-time measurement and on-line calculation of generation shedding. The proposed stabilizing scheme was applied to case study of real power system and the results obtained by the method compare well with the results by simulation.

1. 서 론

전력계통 구성이 복잡해지고 발전소가 대규모화되면서 사고발생시 계통운용상태와 사고발생 장소에 따라 다수의 발전기가 계통으로부터 동기탈조하려는 방향으로 응동하게 된다. 이와같은 대단위 발전기 군을 계통으로부터 탈조 경향을 나타낼때 사고 발생 직후 안정화제어를 실시하여 이를 미연에 방지하기 위한 고속안정화제어 알고리즘은 크게 사고 직후 과도안정도 판별을 위한 단계와 과도불안정 판별시 최적의 안정화제어량을 결정하는 단계로 나누어진다. 본 논문에서는 발전소 자단 측정정보를 이용하여 실시간으로 탈조 경향을 나타내는 발전기 군의 $P-\delta$ 곡선추정과 에너지 함수법에 의한 에너지 계산으로 동기 탈조 여부를 예측하고 불안정이 예측될시 전원 제한에 의한 안정화 제어 scheme을 제시하고자 한다.

2. 에너지 해석에 의한 동기 탈조 예측

에너지 함수법은 등면적법을 다기 계통의 안정도 해석에 확장한 에너지 계산에 의한 안정도 해석 방법이다. 에너지 함수법에 의한 안정도 해석은 외란 기간중 계통에 유입된 과도 에너지와 외란 제거후 계통이 흡수 변환 할 수 있는 능력과의 상호 비교로 이루어진다[1].

2.1 등가 계통 모형

계통 운용시 제 1과 동기탈조 방지를 위한 긴급제어로서 전원제한 같은 안정화 제어를 위한 계통해석에서의 발전기 모형은 off-line 해석에 적용되는 정교한 수리모형 보다 간략화된 모형을 사용하게 된다. 여기서는 고전모형에 의한 간략화 모델 계통을 그림 1에 나타내었다. 여기서 각 그룹 발전기 군은 주계통으로부터 탈조경향을 나타내는 발전기 군이며, 그룹 a와 b로 구분한 것은 전원제한 제어 후 응동 특성이 다르게 되는 경우를 구분하기 위한 것이다. 이러한 모형에 의한 안정도 계산은 정밀 모형에의한 계산에 비해 conservative 한 오차가 발생하는데 이는 전원 제한과 같은 비상제어 측면에서 불가피한 trade-off라 할 수 있다[2-6].

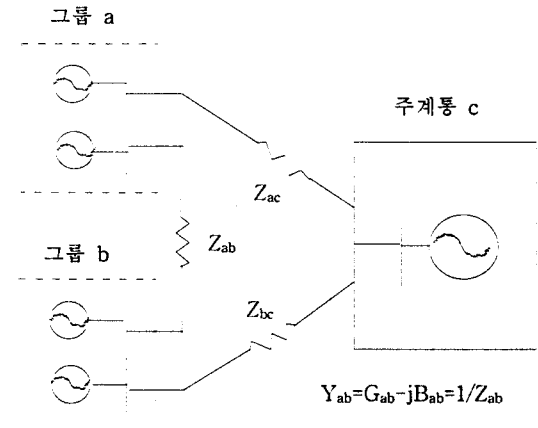


그림 1 등가 계통 모형

그림 1의 등가 계통 계통에 대한 운동 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M_I \frac{d^2 \delta_I}{dt^2} = P_{M_I} - P_{e_I} = P_{COI}, \quad I = a, b, c \quad (1)$$

여기서

$$M_I = \sum_{i \in I} M_i, \quad P_{M_I} = \sum_{i \in I} P_{M_i}, \quad P_{e_I} = \sum_{i \in I} P_{e_i}$$

$$\delta_I = \frac{\sum_{i \in I} M_i \delta_i}{M_I}$$

이 때 그림 COI 간 운동 방정식은 식 (2)와 같이 된다.

$$M_I \frac{d^2 \theta_I}{dt^2} = P_{COI} - \frac{M_I}{M_c} P_{COI}, \quad I = a, b \quad (2)$$

$$\theta_I = \delta_I - \delta_c$$

$$\omega_I = \frac{d\theta_I}{dt}$$

2.2 에너지 계산

식(2)로 표현되는 각 그룹 발전기 COI의 주계통에 대한 개별 에너지 함수는 다음과 같이 정의 된다.

$$V_I = \frac{1}{2} M_I \left(\frac{\omega_I}{dt} \right)^2 - \int_{\theta_I}^{\theta_I} \left(P_{COI} - \frac{M_I}{M_c} P_{COI} \right) \quad (3)$$

여기서 θ_I^* : 안정평형점

식(3)에서 우변 첫째항은 주계통 c의 관성중심각(COI)에 대한 그룹 I 발전기 COI의 운동에너지 V_{IK} 를 나타내며, 둘째항은 그룹 I 관성중심각과 주계통 관성중심각 간의 등가 연계계통에 의한 위치에너지 V_{IP} 를 나타낸다.

2.3 에너지 비교에 의한 안정도 판정

식(2)와 식(3)으로부터 고장제거후 에너지 변화는 주계통으로부터 분리되려는 방향으로 운동하는 발전기 군의 운동에너지는 운동이 진행됨에 따라 위치에너지로 변화되어 계통이 흡수하게 된다. 고장기간 중에 유입된 운동에너지 모두가 위치에너지로 변환되면 안정하게 되고 그렇지 못하면 불안정하게 되며, 이때 계통이 흡수할 수 있는 최대 위치에너지는 불안정 평형점에 대해서 계산되므로 결국 에너지 계산에 의한 안정도 판별은 불안정 평형점에 대한 지식을 필요로 한다. 다시 말하면 에너지 함수법에 의한 안정도 판별은 외란에 의해 계통에 유입된 과도에너지의 계산과 불안정 평형점에서 계산되는 위치에너지간의 크기 비교로 이루어지며 불안정 평형점의 판정과 계산이 부정확하게 되면 부정확한 안정도 판별에 이르게 된다. 본 논문에서는 참고문헌[2, 3]에서

제시한 실측 데이터를 이용한 제1과 동요기간 동안의 $P-\delta$ 곡선 추정에 기초한 안정화 제어량 산정에 관한 방법에 대해 기술하고자 한다.

2.4 발전기단 측정정보에 의한 $P_e-\delta$ 곡선 추정

그림 2는 참고문헌[2]에서 제시한 방법에 따라 추정된 전력-상차각 곡선의 일반적인 형태이다. 여기서 사고기간은 0.1 초 정도이고 전력-상차각 추정기간은 1초 이내이다. 동기탈조가 예측될시의 250 ms 부근에서 generation shedding 제어를 전제하면 실측기간은 약 60-70 ms 정도가 된다.

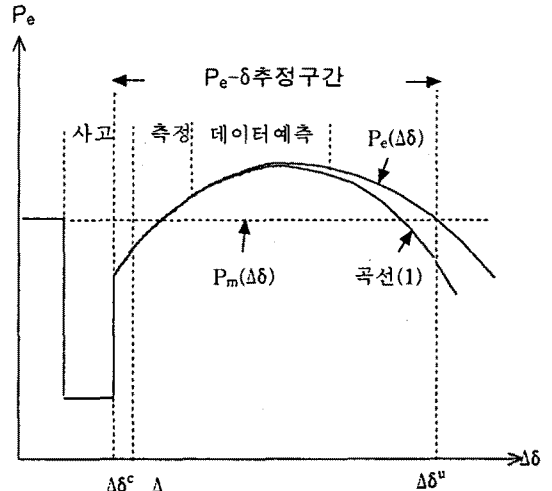


그림 2 $P_e-\delta$ 곡선

3. 안정화 제어를 위한 generation shedding 계산

고장제거시 운동에너지와 불안정 평형점에서 계산된 위치에너지 비교에 의해 불안정이 예측될 경우에는 안정화 제어로써 generation shedding 양을 계산한다.

안정화제어를 실시하는 경우, 예를 들어 a군의 ng대의 발전기중 nt대를 트립하는 것으로 하면, 제어실시에 의한 사고동안의 등가발전기에의 기계적입력 P_{ma}' , 관성정수 M_a' 는 다음과 같이 된다.

$$P_{ma}' = k P_{ma} \quad (4)$$

$$M_a' = k M_a \quad (5)$$

$$\text{여기서 } k = \frac{ng - nt}{ng}$$

그리고 사고지속기간중 전기적출력 P_{ca} 는 P_{ma} 에 비해 매우 작으므로 그 영향을 무시하면, 발전기트립이 실행되었을 때 나머지 발전기들의 사고제거시 운동에너지 V_k' 는 트립전 운동에너지의 k 배가 된다.

$$V_{ak}' = k V_{ak} \quad (6)$$

그리고 발전기트립 후 V_c' 를 계산하기 위해 트립 시점의 위상각($\Delta\delta_a^i$)과 트립후의 P_e - δ 곡선을 식(7)과 같이 나타내어 위치에너지를 계산한다.

$$P_{ea}' = P_0' + P_1' \sin \Delta\delta_a + P_2' \cos \Delta\delta_a \quad (7)$$

발전기 트립 제어가 시행되는 $\Delta\delta_a^i$ 부터 P_e - δ 곡선이 변화하게 되며 식(7)에 대해 그림 3과 같은 형태가 된다.

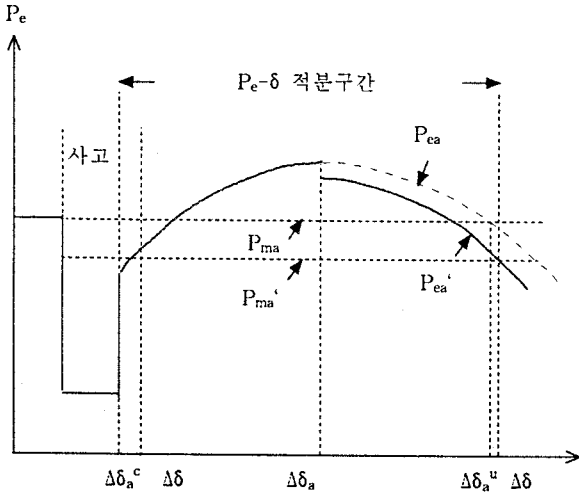


그림 3 발전기 트립에 의한 P_e - δ 곡선의 변화

따라서 발전기트립에 의한 위치에너지 V_{ac}' 는 그림 3에 나타낸 바와 같이 사고제거시 위상각 $\Delta\delta_a^i$ 로부터 트립후 불안정평형점의 위상각 $\Delta\delta_a^u$ 까지 적분하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{ac}' &= \int_{\Delta\delta_a^i}^{\Delta\delta_a^c} (P_{ea} - k P_{ma}) d\Delta\delta_a + \int_{\Delta\delta_a^c}^{\Delta\delta_a^u} (P_{ea}' - k P_{ma}') d\Delta\delta_a \quad (8) \\ &= (P_0 - kP_1)(\Delta\delta_a^c - \Delta\delta_a^i) + 0.5kP_3((\Delta\delta_a^c)^2 - (\Delta\delta_a^i)^2) \\ &\quad + P_1(\cos(\Delta\delta_a^c) - \cos(\Delta\delta_a^i)) + P_2(\sin(\Delta\delta_a^c) - \sin(\Delta\delta_a^i)) \\ &\quad + (P_0' - kP_1')(\Delta\delta_a^u - \Delta\delta_a^c) \\ &\quad + P_1'(\cos(\Delta\delta_a^u) - \cos(\Delta\delta_a^c)) + P_2'(\sin(\Delta\delta_a^u) - \sin(\Delta\delta_a^c)) \end{aligned}$$

여기서 $\Delta\delta_a^u$ 는 $P_{ea}' = P_{ma}'$ 가 되는 불안정평형점의 위상각변화분으로 다음과 같이 구한다.

$$\Delta\delta_a^u = \pi - \sin^{-1}\left(\frac{kP_{ma}' - P_0'}{\sqrt{P_1'^2 + P_2'^2}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{P_2'}{P_1'}\right) \quad (9)$$

이들 V_{ak}' 와 V_{ac}' 에 의해 발전기트립량의 결정은 식(10)을 만족하는 최소의 트립량으로 정한다.

$$V_k' \leq V_c' \quad (10)$$

4. 사례연구

본 논문에서 제시한 안정도판정 및 제어 기법을 검증하기 위해 사례연구를 다음과 같이 수행하였다.

4.1 시뮬레이션 조건

분석 대상 계통조건과 적용상정사고 해석 case는 1과 같다.

표 1 분석대상 계통 조건 및 적용상정사고 case

| 계통이름 | 1998년 Peak load | | 총발전량 : 38,722MW | |
|----------|-----------------|-----------------------|-----------------|-------|
| 발전기군 | 발전기대수 | 관성정수(H _i) | MBase | xd' |
| 태안T/P | 4 | 3.6 | 613 | 0.282 |
| 보령T/P | 4 | 3.41 | 613 | 0.260 |
| Case No. | 사고선로 | | 안정도해석 발전기명 | |
| 1 | 신당진-아산 선로 | | 태안 T/P | |
| 2 | 아산-화성 선로 | | " | |
| 3 | 화성-서서울선로 | | " | |
| 4 | 당진-아산 선로 | | 보령 T/P | |
| 5 | 아산-화성 선로 | | " | |
| 6 | 화성-서서울 선로 | | " | |

4.2 검토 결과

에너지 해석에 의한 안정도 판별 제어량 계산 결과를 정리하면 표 2와 같다.

표 2 안정화제어량 계산 결과

| Case | Trip 대수 | V _k | V _c | 안정도 | Δδ ^c | Δδ ⁱ | Δδ ^u | P ₀ | P ₁ | P ₂ |
|------|---------|----------------|----------------|-----|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 0 | 3.33 | 2.52 | 불안정 | -1.87 | 36.27 | 80.70 | 5.64 | 12.59 | 10.68 |
| | 1 | 2.50 | 7.83 | 안정 | " | " | 97.82 | 4.61 | 11.11 | 10.10 |
| 2 | 0 | 2.54 | -1.0 | 불안정 | -1.63 | 38.33 | - | 4.40 | 8.02 | 8.92 |
| | 1 | 1.91 | 0.80 | 불안정 | " | " | 52.41 | 3.60 | 6.97 | 8.40 |
| | 2 | 1.27 | 5.03 | 안정 | " | " | 76.57 | 2.51 | 5.42 | 7.38 |
| 5 | 0 | 3.47 | -1.0 | 불안정 | -1.95 | 43.05 | - | 2.77 | 11.42 | 10.52 |
| | 1 | 2.60 | 2.03 | 불안정 | " | " | 57.63 | 1.89 | 9.01 | 8.80 |
| | 2 | 1.73 | 5.88 | 안정 | " | " | 67.42 | 1.07 | 6.35 | 6.63 |

표 2의 결과는 Case 1, 2, 5의 경우 각각 1, 2, 2대의 발전기트립에 의해 계통은 안정을 회복할 수 있음을 나타낸다. PSS/E 시뮬레이션 결과와 비교하기 위해 Case 1, 2, 5에 대해 270ms에서 발전기트립을 시켰을 때 발전기 트립대수에 따른 안정도 해석 결과를 각각 그림 4, 5, 6에 나타내었다.

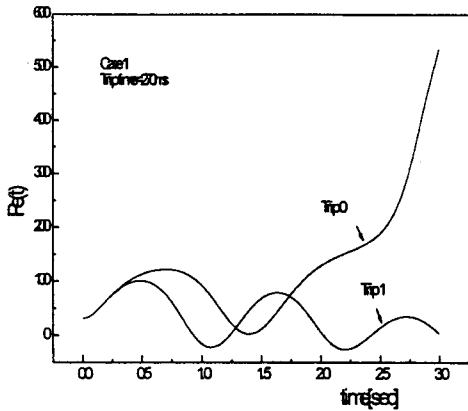


그림 4 Case 1의 발전기 트립대수에 따른 발전기각 동요 (PSS/E 시뮬레이션 결과)

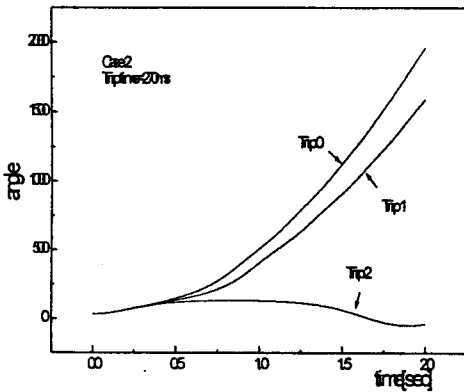


그림 5 Case 2의 발전기 트립대수에 따른 발전기각 동요 (PSS/E 시뮬레이션 결과)

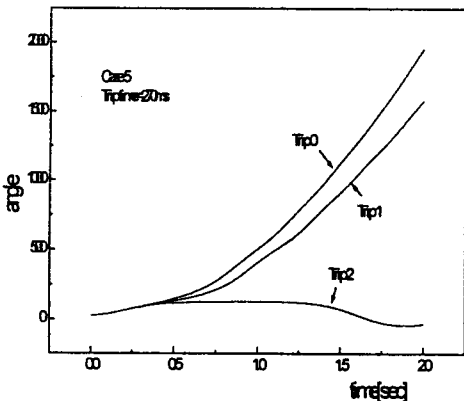


그림 6 Case 5의 발전기 트립대수에 따른 발전기각 동요 (PSS/E 시뮬레이션 결과)

이와 같이 PSS/E 시뮬레이션의 안정도해석 결과와 본 논문에서 제시한 방법의 의한 제어 결과와 잘 일치하고 있음을 알수있다.

5. 결론 및 토의

본 연구에서는 다기계통에서 근방선로사고에 의해 발전기군이 탈조하는 경우 실시간으로 탈조발전기단에서의 측정정보를 사용하여 에너지함수법에 의해 안정도를 판정, 최적제어량을 결정하여 고속으로 안정화를 도모하기 위한 안정화제어 기법을 제시하였다. 본 안정화 제어기법은 on-line 적용을 위해 아래와 같은 고속 계산기법을 적용하였다.

- (1) 측정정보에 의해 발전기각 변화와 출력변화를 실시간으로 예측하는 방법
- (2) $P_e-\delta$ 곡선 추정에 의한 on-line 동기탈조 여부 판정
- (3) generation shedding에 따른 $P_e-\delta$ 곡선의 변화를 추정한 안정화제어량 산출

이들 제안한 방법을 계통해석 전산프로그램 PSS/E 시뮬레이션 결과와 비교 검증하여 그 유용성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] A.A. Fouad, Vijay Vittal, "Power System Transient Stability Analysis using the Transient Energy Function Method", Prentice-Hall, New Jersey, 1992.
- [2] 오태규, 김학만, 서의석, 김일동, 김용학, "안정화 제어를 위한 on-line 동기탈조 예측기법", 전력계통연구회 1997년도 춘계학술발표회 논문집, pp28-32.
- [3] Y. Ohura, N. Nagai, S. Takeda, "Development of a Generator Tripping System for Transient Stability Augmentation Based on the Energy Function Method", IEEE trans. Vol. PWRD-1, No. 3, July 1986.
- [4] 西田正吾, "전력계통의 긴급제어에 있어서 에너지법에 기준한 제어량결정 알고리즘", 전기학회 논문지 B, 102권 10호, 소화 57-10.
- [5] 山本誠, 合田忠弘, "온라인 사후연산형 과도안정도 후비제어이론 개발", PE-95-22.
- [6] 柳橋健, 中村智, "과도 중간영역의 탈조현상에 대응한 안정화제어 방식에 대하여", PE-94-91.