

실시간 과도안정도가 고려된 송전선 적응 재폐로 계전시스템

장성익, 박순규, 윤장완, 이종주, 신명철*
한국전력공사, 성균관대학교

**The Adaptive Autoreclosure Relaying Scheme
with Real-time Transient Stability of Transmission line**

S.I. Jang, S.K. Park, J.W. Yoon, J.J. Lee, M.C. Shin
KEPCO, SKKU

Abstract - 전력계통의 안정도 향상 방안으로 적용되는 재폐로계전기에서 재폐로의 성공뿐만 아니라 투입시점에 따른 최적재폐로의 적용으로 계통의 동요를 최소화 하게 된다. 본 논문에서는 순간고장 제거 후 계통 안정화되는 계통의 최적재폐로 적용과, 불안정하게 되는 계통에서의 직렬 커패시턴스 투입 재폐로 제어로 안정화 가능성을 높였고, 영구고장으로 재폐로 실패되어 계통이 불안정해지는 경우에 계통 최소충격을 위한 최적재폐로가 적용되도록 하였다. 이를 위해 순간고장과 영구고장의 식별 기법과 광역 측정장치(WAM), 고속전송 적용 등으로 계통 안정도의 정도를 판별, 예측하여 실시간 과도안정도가 고려된 최적제어가 되도록 하였다.

는 최적재폐로 알고리즘을 그림 1과 같이 제시한다. 아래의 알고리즘에서 고장유형 판별은 순간고장과 영구고장을 구분하고, 순간고장으로 판별이 되면 고장제거 후 계통안정이 예측되는 경우(각속도의 부호 변화 +, -)는 고장제거 후 위상각 최저 시점에서 최적재폐로가 계통을 더욱 안정화 시키고, 계통 불안정 경우(각속도 지속상승, 부호변화 없음)는 소이온화 후 직렬커패시턴스 투입하여 재폐로 되도록한다. 영구고장으로 재폐로 실패되는 경우까지 고려하여 계통에 가해질 수 있는 2차 충격을 충분히 상쇄시킬 수 있는 영구 고장의 최적재폐로 시점(최소 각속도)에서 재폐로를 투입하여 계통의 안정화를 도모한다.

1. 서 론

자동재폐로는 전력계통의 용량, 신뢰성, 안정도 향상을 위한 경제적이고 효과적인 방법으로 재폐로가 실행되어 성공하게 되면 대체적으로 계통의 안정도와 전력 수송의 연속성을 향상 시킬 수 있다.

그런데, 재폐로가 성공하더라도 투입시점에 따라서 계통의 동요가 증가하거나 감소할 수 있어 최적재폐로 시점으로 계통의 동요를 최소화 하게 된다[1].

영구고장 발생시 자동 재폐로를 수행하면 전력계통과 설비에 심각한 충격을 초래 할 수 있어, 자동재폐로 수행에서 영구고장과 순간고장을 구분하여 적용하고, 이러한 영구고장으로 인해 계통이 불안정해지는 것을 막기 위해 재폐로가 실패되더라도 계통에 최소 충격을 줄 수 있는 최적 재폐로를 검토하였다.

또한, 재폐로가 성공되더라도 계통이 불안정하게 되는 경우 직렬커패시턴스를 투입하여 제어되도록 하여 계통 안정도 향상을 검토하였다.

최근 광역 측정장치(WAM)와 고속 전송기술 향상으로 실시간 과도안정도 제어가 제시되고 있다.

고장 발생시 위상측정 장치(PMU)가 고장진행 동안 각 발전기 정보를 취득하고 비상 확장등면적법(EEEAC)으로 안정의 정도를 판별, 예측하여 최적 제어 하게 된다.[2]

EMTP MODELS로 제안 알고리즘을 구현하여 재폐로 시의 안정도 변화를 모의하였다.

2. 본 론

2.1 안정도 향상을 위한 최적재폐로 알고리즘.

과도안정도 측면에서 계통의 안정도를 향상 시킬 수 있

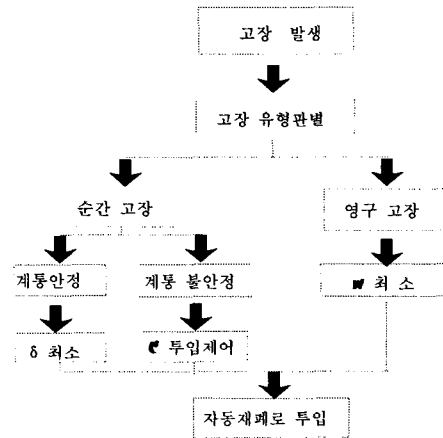


그림 1. 최적재폐로 알고리즘

2.2 비상 확장등면적(EEEAC)에 기초된 과도 안정도 적용

EEEAC는 EEAC와 달리 계산에 의한 것이 아니라 실시간 측정치에 의하여 얻어진다. 다기계통 발전기를 위험 발전기군(critical group)와 나머지 발전기군(remained group)으로 나누어 등면적법에 의해 과도안정도를 평가할 수 있는 2기계통으로 등가화 한다.

- 다기 계통 과도안정도 예측, 식별을 위해

$$\delta_i = \omega_i$$

$$M_i \omega_i = P_{mi} - P_{ei} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$P_{ei} = E_i^2 Y_{ii} \cos\theta_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i} E_i E_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (1)$$

여기서 δ_i, ω_i, M_i : i 번째 발전기 각, 각속도, 관성
 정수

P_{mi}, P_{ei} : i 번째 발전기 기계력, 전기력
 E_i : i 번째 발전기 직축 과도리액턴스 배후
 전압

Y_{ij}, θ_{ij} : 내부발전기 절점에서 ij 번째 축약 어
 드미턴스 요소의 모듈, 배열

고장발생, 제거 시간동안 EEEAC는 PMU로 실측된
 발전기 각, 각속도, 전력을 사용하여 과도안정도를 예측,
 평가하기 위해 고속 전송되어 계산된다.

위험 발전기군(critical group)은 식 2과 같고,

$$M_s = \sum_{i \in S} M_i \quad \delta_s = M_s^{-1} \sum_{i \in S} M_i \delta_i \quad (2)$$

나머지 발전기군(remained group)은 식 3과 같다.

$$M_a = \sum_{j \in A} M_j \quad \delta_a = M_a^{-1} \sum_{j \in A} M_j \delta_j \quad (3)$$

이것은 2기 계통으로 축약되어

$$\delta = \delta_s - \delta_a$$

$$M = M_a M_s / (M_a + M_s)$$

$$P_m = M^{-1} (M_a \sum_{i \in S} P_{mi} - M_s \sum_{j \in A} P_{mj}) \quad (4)$$

결국 2기 무한모선 등가회로가 얻어진다.

여기서 가속면적(추가 운동에너지)은 실시간 측정치에
 서 얻어지고, 감속 면적(위치에너지)은 초기의 약간 측정
 치로부터 예측되어 질 수 있다.

또한 각속도 변화(wi)만의 실측으로 최적 시점을 얻을
 수 있다. 각속도의 변화(wi)를 예측하기 위하여 식 5)와
 같이 과거 세 점 t_0, t_1, t_2 에서의 wi를 사용한다.

$$wi(t) = wi(t_2) + a_1(t-t_2) + a_2(t-t_1)(t-t_2) \quad (5)$$

$$\text{여기서 } a_0 = (wi(t_1) - wi(t_0)) / (t_1 - t_0)$$

$$a_1 = (wi(t_2) - wi(t_1)) / (t_2 - t_1)$$

$$a_2 = (a_1 - a_0) / (t_1 - t_0)$$

전력각 $\delta_i(t)$ 의 예측은 다음 식 6)과 같다.

$$\delta_i(t) = \int_{t_0}^t wi(t) dt + \delta_i(t_0) \quad (6)$$

$$= \delta_i(t_0) + wi(t_2)(t-t_0) + a_1(t^2 - t_0^2) / 2$$

$$+ a_1 t_2(t-t_0) + a_2 [(t^3 - t_0^3) / 3 - (t_1 + t_2)(t^2 - t_0^2) / 2 + t_1 t_2(t-t_0)]$$

두 발전기의 위상차는 다음 식 11)과 같다.

$$\Delta\delta_{pr}(t) = \delta_p(t) - \delta_r(t) + \Delta\delta_{pr}(0) \quad (7)$$

여기서 $\Delta\delta_{pr}(0)$ 는 외란이 사라졌을 때 두 발전기 사이
 의 전력각이다.

만약 $\Delta\delta_{pr}(t)$ 이 증가하여 문턱값1(시뮬레이션 결과)을
 초과하면 계통 불안정하게 된다.

2.3 모의사례 결과

다기계통에서 축약된 그림 2의 1기 무한모선의 모의
 계통에서 각 경우를 EMTP로 구현하였다.

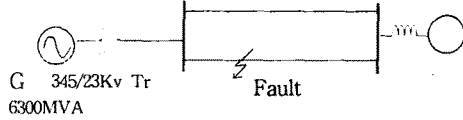


그림 2. 모델계통 예시

2.4 순간고장 경우의 재폐로

1) 고장제거 후 계통이 안정한 경우

고장 제거 후 계통이 안정여부 및 최적재폐로 시점을
 예측하기 위하여 위 식 5)를 활용한다.

3상 단락고장 제거 후 안정으로 판단할 수 있는 $w_i(t)$
 의 값이 0이 되는 직후의 과거 세 점의 $w_i(t)$ 의 측정값
 이 아래와 같으면,

$$t_0 : 2.21초 \quad w(t_0) : -0.01427$$

$$t_1 : 2.2464초 \quad w(t_1) : -0.10589$$

$t_2 : 2.2828초 \quad w(t_2) : -0.19323$ 에서 예측된 최적 시점은
 3.06488초가 되어, 실제 시뮬레이션에 의한 최적 제어
 점 3.02016초와 큰 오차가 없다.

위 결과로부터 모의 결과는 기존의 재폐로(0.4초 후
 재폐로)방식을 적용하였을 경우의 각-각속도 변화(그림
 3)보다는 최적재폐로 방식을 적용한 경우에 계통이 안정
 상태로의 수렴이 훨씬 양호하게 됨을 보이고(그림4) 예
 측시점의 최적재폐로 결과는 기존의 재폐로 보다는 계통
 동요가 빨리 수렴되었고, 실제 계통의 최적재폐로에 의
 한 계통안정도 변화와 거의 일치하게 됨을 보이고 있
 다.(그림 5)

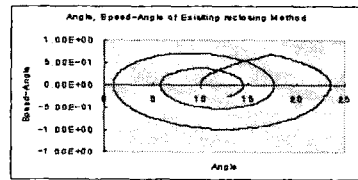


그림 3. 기존재폐로 적용 경우 발전기 각-각속도 변화

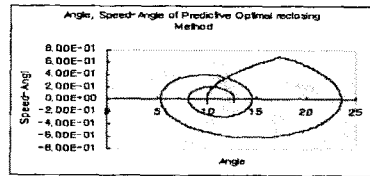


그림 4. 최적재폐로 적용 경우 발전기 각-각속도 변화

2) 고장제거 후 계통이 불안정한 경우

3상 단락고장 제거 후 불안정계통으로 판정되는 결과
 에서는 최적재폐로 시점을 예측할 수 없고, 기존 재폐로
 방식을 적용한 결과도 불안정한 결과를 보이고 있다.(그
 림 6)

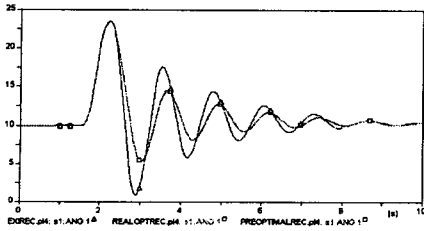


그림 5. 외란 후 계통 안정한 경우의 제어결과

고장제거(2.4초)후 불안정계통에 기존 재폐로방식 적용결과도 불안정 결과를 보이게 되나, 앞의 식 7)에 의해 불안정 판정되는 시점(2.8초)에 상정고장에 의해 산정된 직렬 커패시턴스를 투입하여 아크소호 후 재폐로를 적용한 시뮬레이션 결과는 계통안정을 나타내고 있다.[2] 고장 제거(2.4초) 후 아래의 실측 데이터를 식 7)에 적용하여

$t_0 : 2.418 \quad \delta_0 : 54.19263 \quad w_i(t_0) : 1.911316$
 $t_1 : 2.4388 \quad \delta_1 : 56.438 \quad w_i(t_1) : 1.856555$
 $t_2 : 2.4596 \quad \delta_2 : 58.161602 \quad w_i(t_2) : 1.798829$

불안정 판정을 위한 위상각 90도 예측 시점을 커패시턴스 투입 시점(2.8초)으로 하여 모의하였다.

모의 결과는 그림 6에서 보인 것처럼 고장 제거 후에도, 기존 재폐로 방식을 적용한 결과도 불안정한 계통 동요를 보이게 되어 직렬커패시턴스를 투입하여 아크소호 후 시행한 재폐로 결과는 그림에서와 같이 계통 동요가 감소되어 계통안정 회복 가능성을 높였다.

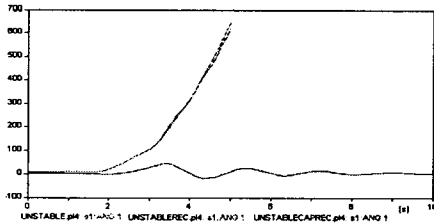


그림 6. 외란 후 계통 불안정한 경우의 제어 결과

2.5 영구고장 경우의 재폐로

1선 영구지락고장에서 고장제거 후 기존의 재폐로 방식 적용 결과는 재폐로를 하지 않았을 때보다 계통이 오히려 더 불안정해지나, 예측 최적재폐로(최저 ω 시점)에 의해 계통 동요가 훨씬 감소됨을 보이고 있다.(그림 7)

고장 차단 후 안정을 판정한 후 측정된 과거 세 점의 $w_i(t)$ 값

$t_1(2.184) ; w_i(t)(-0.02942998)$
 $t_2(2.2204) ; w_i(t)(-0.0974016)$

$t_3(2.2568) ; w_i(t)(-0.16167466)$ 으로부터 예측한 최적 재폐로 시점은 2.537이었다.

이는 실제 모의계통 최적재폐로 시점 2.5272과 큰 차이가 없었고, 두 시점에 의한 모의 결과도 거의 일치함을 보인다.

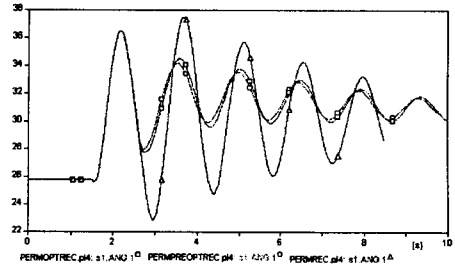


그림 7. 영구고장 외란 계통의 제어 결과

3. 결 론

전력계통의 외란은 상시 발생할 수 있게 되는데 외란으로 발생한 계통 불안정에 대처하기 위한 경제적이고 효과적인 방법으로 재폐로가 실행된다.

그런데, 재폐로가 성공하더라도 투입시점에 따른 최적 재폐로를 적용함으로써 계통의 동요를 최소화 하게 된다.

순간고장 제거 후 계통 안정화되는 계통에 최적재폐로 적용으로 계통 동요를 최소화 하였고, 재폐로 수행결과가 불안정하게 되는 계통에는 상정고장으로 산출된 커패시턴스투입 재폐로 적용으로 계통안정화 가능성을 높였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Jeong-Yong Heo, Chul-Hwan Kim "An Adaptive Autoreclosure Scheme with Reference to Transient Stability for Transmission Lines" KIEE International Transactions on PE 2003.pp.698-704
- [2] Lei Qingsheng, Li Guangxi, Chen yongping, "Real-Time Prediction and Control for Transient Stability of Multi-Machine Power System", IEEE pp. 1361-1363 1998.