

에너지 함수를 이용한 분산전원 연계 계통의 재페로 기법

서훈철*, 김철환**

기초전력연구원*, 성균관대학교**

A Reclosing Technique using Energy Function in Distribution System with Distruted Generation

*Hun-Chul Seo, **Chul-Hwan Kim

*KESRI, **Sungkyunkwan University

Abstract - 분산전원의 계통 연계 증가로 인하여 전력 계통의 과도안정도에 미치는 영향 역시 증가하고 있으며, 이로 인하여 재페로에 미치는 영향 역시 증가하고 있다. 과도 안정도 평가 방법으로는 등면적법, 확장 등면적법, 과도 에너지 함수법 등이 있다. 이 중 과도 에너지 함수법은 포텐셜 에너지와 운동 에너지를 이용하여 과도 안정도를 평가하는 방법으로 분산전원이 연계된 배전계통 같이 복잡한 계통에서 과도 안정도 평가를 용이하게 할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 에너지 함수를 이용한 분산전원 연계 계통의 재페로 기법을 제시하였다. 에너지 함수를 이용하여 계통의 과도 안정도를 평가하며, 그 여부에 따라 재페로 방법을 달리한다. 또한, 제시한 기법을 EMTP MODELS로 구현하였으며, 한전 실 계통에 적용하여 그 타당성을 평가하였다.

1. 서 론

과도 안정도 평가 방법에는 가장 널리 사용하는 방법으로 등면적법(Equal Area Criterion)이 있다. 등면적법은 계통의 전력-위상각 곡선을 이용하여 안정도를 평가하는 방법으로 기본적으로 1기 무한모선의 계통 모델에서 이루어진다. 1기 무한모선의 계통을 다기 계통으로 확장하였을 경우, 등면적법은 적용할 수 없고 확장 등면적법(Extended Equal Area Criterion)이 적용된다. 확장 등면적법은 다기계통의 발전기를 회전자 각의 변화 크기에 따라 정렬하여 critical machine과 remaining machine으로 구분한 후 등면적법과 같은 방법으로 과도 안정도를 해석하는 방법이다[1]. 등면적법 같은 경우는 1기 무한모선에서 적용되므로, 배전계통 같은 다소 복잡한 계통에 적용하기에는 무리가 있다. 또한, 확장 등면적법 같은 경우는 발전기를 critical machine과 remaining machine으로 구분하는 것에 다소 어려움이 있다. 과도 안정도 평가의 또 다른 방법으로 에너지 함수를 이용하는 방법이 있다. 이 방법은 계통의 운동에너지와 포텐셜 에너지의 합인 에너지 함수를 이용하여 과도 안정도를 평가하는 방법이다[2]. 이 방법은 분산전원이 연계된 배전계통 같이 복잡한 계통에서 과도 안정도 평가를 용이하게 할 수 있으며, 확장 등면적법 같이 발전기들을 critical machine과 remaining machine으로 구분할 필요가 없으므로 보다 편리하게 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

따라서, 본 연구에서는 에너지 함수를 이용한 분산전원 연계 계통의 재페로 기법을 제시하였다. 제안된 기법은 에너지 함수 중 포텐셜 에너지의 요소를 이용하여 고장제거 여부를 판단하며, 에너지 함수를 이용하여 실시간으로 안정도를 판단하고, 그 결과에 따라 분산전원의 분리 유무를 결정하여 재페로 알고리즘이 달리 적용되는 방법이다. 제안한 기법의 효율성을 검증하기 위하여 우선, 에너지 함수를 EMTP MODELS를 이용하여 구현한 후, 한전 실계통 모델(X S/S X D/L)에 적용하여 제한한

재페로 기법을 검증하였다.

2. 에너지 함수[2]

에너지 함수 W는 다음 식 (1)과 같이 정의된다.

$$W = W_1 + W_2 \tag{1}$$

여기서, W_1 은 운동 에너지이고 W_2 는 포텐셜 에너지로 다음 식 (2), (3)과 같이 주어진다.

$$W_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m M_i \omega_i^2 \tag{2}$$

$$W_2 = \sum_{k=1}^{ns} \int_{t_0}^t (P_k - P_{ks}) \frac{d\delta_k}{dt} dt \tag{3}$$

여기서, P_k 는 직렬 요소 k에서의 조류이고, P_{ks} 는 P_k 의 정상상태 값이다. 또한, δ_k 는 요소에 대한 위상각 차이이고, ns 는 전체 직렬 요소의 수이다.

3. 에너지함수를 이용한 재페로 기법

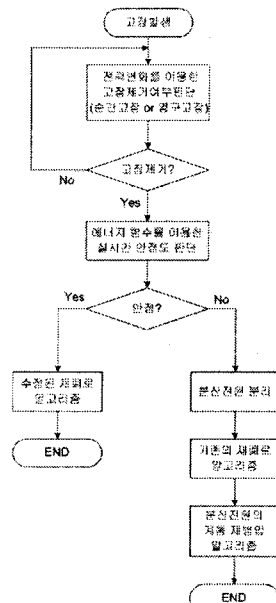


그림 1. 에너지함수를 이용한 재페로 기법

분산전원 연계계통에서 안정도를 고려한 재폐로 기법은 그림 1과 같다. 우선, 고장 제거 여부를 판단하며, 제거되었을 경우 에너지 함수를 이용하여 안정도를 판단한다. 안정한 경우 분산전원을 분리하지 않고, 수정된 재폐로 알고리즘에 따라 재폐로를 시행하며 불안정한 경우 분산전원을 분리한 후 기존의 재폐로 알고리즘에 따라 재폐로를 시행한다. 분산전원의 계통 재병입 알고리즘은 [3]에 제시되어 있으며, 나머지 알고리즘은 다음과 같다.

3.1 고장제거 여부 판단

선로의 전력변화를 이용한 고장제거 여부 판단 알고리즘의 순서도는 다음 그림 2와 같다. 고장 발생 시, P_k 와 P_{ks} 의 차이를 계산하여 P_{fault} 에 저장한다. Moving Window를 기반으로 한 샘플씩 이동하며 $P_{fault}[n] - P_{fault}[n-1]$ 을 계산한다. 이 값이 일정값(α)보다 크다면, Count를 계산한다. 여기에서, α 에 절대값을 이용한 이유는 방향에 따라 전력의 부호가 반대가 될 수 있기 때문이다. Count가 주어진 값 β 보다 크다면, 즉, $P_{fault}[n] - P_{fault}[n-1]$ 가 일정시간 이상 연속으로 큰 값을 보인다면 고장이 제거된 것으로 판단하며 그렇지 않다면 고장은 지속되고 있는 것으로 판단한다. 즉, 영구고장인 것으로 판단한다.

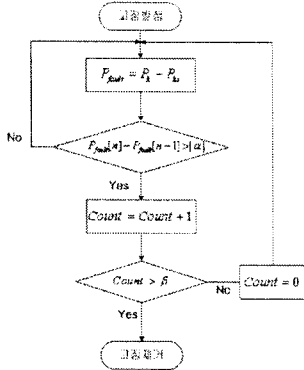


그림 2. 고장제거 여부 판단 알고리즘

3.2 에너지 함수를 이용한 실시간 안정도 판단

본 연구에서 제안한 에너지 함수를 이용한 실시간 안정도 판단 기법의 순서도는 다음 그림 3과 같다.

안정한 경우에 에너지 함수에 함유된 고조파의 양은 시간이 갈수록 점점 줄어들며, 어떤 일정값(α) 이하로 유지된다. 따라서 우선, 지역 통과 필터를 기친 후 통과 전과 통과 후의 파형을 이용하여 고조파의 양을 구하고, 이 양의 실효치를 구한다. 이렇게 구한 값이 α 이하로 유지되며, 시간이 지날수록 감소하는지 여부를 체크하여 안정도를 판단한다. 안정도를 판단하기 위하여 또 다른 조건으로 에너지 함수의 변화율을 이용한다. 안정한 경우에 그 중요정도가 점점 줄어들기 때문에, 변화율을 이용하여 각 중요 시 최대값을 구하여 이 최대값이 계속 감소하는지 여부를 살펴보면 안정도를 판단할 수 있다. 각 중요 시 최대값은 에너지 함수의 변화율이 (+)에서 (-)로 변화하는 시점에서의 값이 된다. 따라서, moving window를 기반으로 현재 샘플에서의 변화율은 (-)이며, 이전 샘플에서의 변화율은 (+)가 되는 시점을 찾아 그 값을 구할 수 있으며, 이 값이 계속 감소할 경우에 안정한 것으로 판단할 수 있다.

불안정한 경우에 에너지 함수는 계속 중요하므로 고조파의 양은 줄어들지 않게 되며, 중요 여부도 점점 감소하지 않는다. 따라서, 위 두 조건 중 하나라도 만족되지 않는다면, 불안정한 것으로 판단할 수 있다.

그림 3에서 α 는 계통의 특성에 따라 달라질 것이다. $Count W_{고조파}$ 와 $Count W_{max}$ 는 각 특성이 지속되는지 확인하기 위한 최소 샘플치로서, 계통의 특성에 따라 β 값을 0.5초 내외로 설정할 수 있다.

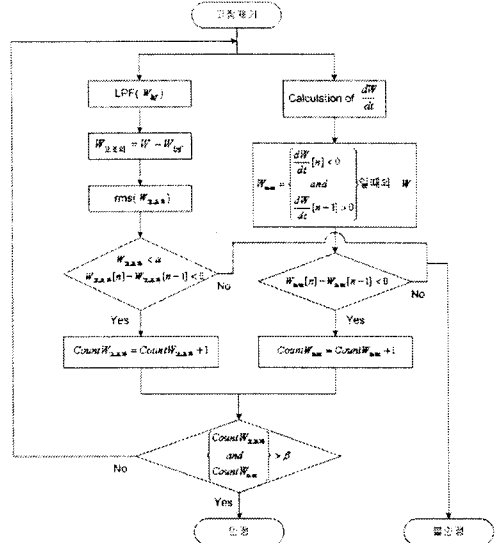


그림 3. 에너지 함수를 이용한 실시간 안정도 판단 기법

3.3 수정된 재폐로 알고리즘

분산전원이 연계된 경우 고장제거 이후 분산전원에 의하여 선로에 전압이 공급되어 'Dead Line' 조건이 충족되지 않는다. 'Dead Line' 조건은 선로의 전압이 일정전압 이하일 때 만족되는 조건이다. 따라서, 새로운 'Dead Line' 조건은 현재의 'Dead Line' 조건에서 고장 제거 후 분산전원에 의하여 선로에 공급되는 전압을 합한 값으로 수정되어야 한다. 즉,

$$V_{\neq W-Deadline} = V_{Deadline} + V_D \quad (4)$$

여기서, $V_{\neq W-Deadline}$ 은 새로이 설정된 Dead Line 전압, $V_{Deadline}$ 은 기존의 Dead Line 전압, V_D 는 분산전원에 의하여 선로에 공급되는 전압이다.

다음 그림 4는 수정된 재폐로 알고리즘의 순서도이다. 고장제거 이후 선로에 흐르는 전압을 계산하여 새로운 Dead Line 조건을 설정하며, 수정된 재폐로 조건이 만족될 경우 재폐로를 시행한다. 만족하지 않을 경우 재폐로를 시행하지 않는다.

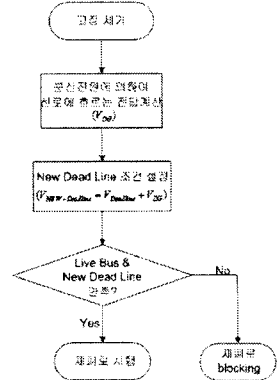


그림 4. 수정된 재폐로 알고리즘

4. 시뮬레이션

4.1 계통모델

본 연구에서 제안한 재폐로 기법을 검증하기 위한 계통은 한전 실 배전계통의 XX S/S XX D/L로서 다음 그림 5와 같다[4]. 그림 5의 계통 모델은 본래 분산전원이 연계되어 있지 않은 모델이다. 그렇지만, 분산전원의 영향을 고려하기 위하여 부하 밀집 지역(선종 : EW160×3 (N)AL95)에 2MW급의 동기발전기가 분산전원으로 연계되어 있다고 가정하였다. 에너지 함수 계산을 위한 블록도 또한 그림 5에 나타나 있다. 운동에너지는 분산전원의 데이터를 이용하여 계산하며, 포텐셜 에너지는 그림 5에서 RCR 차단기의 앞단 모선인 BUS1의 전압과 고장 발생 지역의 하단 차단기인 SW3에 흐르는 전압, 전류를 이용하여 계산할 수 있다. 이렇게 계산된 에너지 함수의 출력은 재폐로 계전기에 입력으로 들어가게 되며, 재폐로 계전기는 BUS1의 전압 및 SW3에 흐르는 전압과 에너지 함수를 이용하여 차단기 RCR의 재폐로 책무를 수행할 뿐만 아니라 분산전원과 계통 연결 스위치(SWDG)를 제어하는 역할을 수행하게 된다.

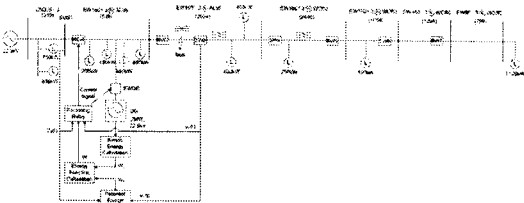


그림 5. 분산전원 및 재폐로 계전기가 연결된 배전계통 모델

4.2 시뮬레이션 결과

2선 지락고장 및 3상 고장을 모의하였으며, 동기발전기의 초기 위상각은 30도이다.

4.2.1 2선지락고장, 고장지속시간 10cycle인 경우

다음 그림 6은 2선 지락고장 시 에너지 함수의 변화이다. 고장이 제거된 후 계통은 안정을 유지하는 것을 알 수 있다. 다음 그림 7은 고장 선로의 전압변화이다. 고장 제거 이후 선로에 전압이 존재하게 된다. 그렇지만, 이 경우는 안정한 경우로서 수정된 재폐로 알고리즘에 의하여 재폐로는 성공적으로 수행되며, 재폐로 이후 전압은 정상상태의 전압을 회복하게 된다.

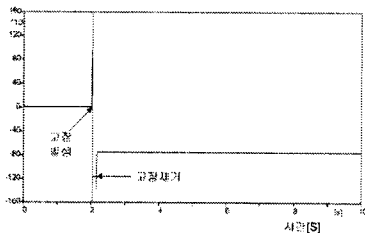


그림 6. 2선 지락고장 시 에너지 함수 변화

4.2.2 3상고장, 고장지속시간 10cycle인 경우

다음 그림 8은 3상고장 시 에너지 함수의 변화이다. 고장 발생 후 에너지 함수의 동요가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이 사례는 불안정한 것으로 판단되어, 분산전원은 분리된다. 분산전원 분리 후 계통의 에너지 함수의 동요가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 2.68초경에 재폐로가 되고 동요가 없어지는 것을 알 수 있다. 다음 그림 9는 선로의 전압변화이다. 고장 제거 이후 안정도

판단 결과 불안정으로 인하여 분산전원은 분리되며, 재폐로가 시행됨을 알 수 있다. 분산전원의 계통 재병입 알고리즘(5초의 전압 및 주파수 확인시간 설정)에 따라 7.78초 경에 분산전원이 계통에 재병입되며, 이 때 계통의 전압 변화는 거의 없음을 확인할 수 있다.

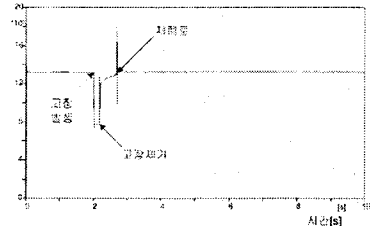


그림 7. 2선 지락고장 시 선로전압 변화

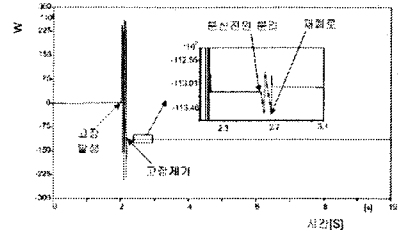


그림 8. 3상 고장 시 에너지 함수의 변화

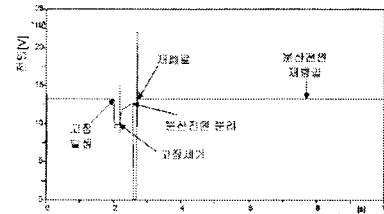


그림 9. 3상 고장 시 선로전압 변화

5. 결론

본 연구에서는 분산전원 연계 계통의 재폐로 기법을 제시하였다. 제시된 기법은 선로의 전압 및 전류, 발전기의 데이터를 이용하여 에너지 함수를 계산하여 전체 전력계통의 안정도를 판단하여, 그 결과를 바탕으로 분산전원의 분리 유무를 결정하여 재폐로를 시행하는 기법이다. 제시된 기법은 한전 실배전계통 모델을 이용한 시뮬레이션을 통하여 검증되었다. 순간고장의 경우 각 고장 종류에 따라 계통의 과도 안정도를 정확하게 판단하며, 재폐로 또한 성공적으로 수행됨을 확인할 수 있었다.

[참고 문헌]

- [1] P.M.Anderson, "Power System Protection", McGRAW-Hill, pp. 853-862, 1999.
- [2] K.R.Padiyar, S.Krishna, "Online Detection of Loss of Synchronism Using Energy Function Criterion", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol 21, No 1. pp.46-55, 2006.
- [3] Hun-Chul Seo, Chul-Hwan Kim, "A Reclosing Technique with reference to Distributed Generation", International Conference on Electrical Engineering 2006.
- [4] 서훈철, 박건우, 김철환, "1단장주 중성선 전류 계산", 대한전기학회 하계학술대회 논문지, pp. 480-481, 2006.