

An Adaptive Autoreclosure Scheme with Reference to Transient Stability for Transmission Lines

許 禎 容* · 金 喆 煥**
(Jeong-Yong Heo · Chul-Hwan Kim)

Abstract - Autoreclosure provides a mean of improving power transmitting ability and system stability. The conventional reclosure adopts the fixed dead time interval strategy, that is, the reclosure is activated after a time delay to restore the system to normal as quickly as possible without regard to the system conditions, however, these simple techniques cannot give the optimal operating performance. For this reason, various adaptive reclosure algorithms have been proposed recently.

This paper presents an adaptive autoreclosure algorithm including the variable dead time, optimal reclosure, sequential reclosure and emergency extended equal-area criterion (EEAC) algorithm in order to improve the system stability. The reclosure algorithm performs out the operations that are attuned to the power system conditions. The proposed adaptive reclosure algorithm is verified and tested by using EMTP MODELS, and the simulation results show that the system oscillations are reduced and the transient stability is enhanced by employing the proposed adaptive reclosure algorithm.

Key Words : Autoreclosure, Adaptive Reloclosure, Optimal Reclosing Time, Sequential Reclosure, Transient Stability

1. 서 론

자동재폐로는 전력계통의 용량, 신뢰성, 안정도 향상을 위한 경제적이고 효과적인 방법이다. 하지만, 영구고장 발생 시 자동재폐로를 수행하면 계통과 장비에 심각한 손상을 야기할 수 있다. 따라서, 자동재폐로 수행에서 영구고장과 일시고장을 구분하는 것은 매우 중요하다. 하지만, 영구고장과 일시고장을 구분하는 것은 매우 어렵기 때문에 현재 사용되고 있는 자동재폐로는 차단기 트립 후 일정한 무전압시간이 지나면 고장의 종류에 관계없이 재폐로 시키는 방법을 사용하고 있다. 최근에는 영구고장과 일시고장을 구분하는 다양한 방법이 제안되고 있지만[1-2], 여기서 제안된 방법들을 사용하여 영구고장과 일시고장을 구분하고 2차 아크의 소호 시간을 추정할 수 있다고 해도, 2차 아크가 소호 된 후, 즉시 재폐로를 수행하는 것이 과도 안정도 측면에서 항상 좋은 것은 아니다. 과도 안정도 향상을 위한 최적 재폐로시간은 재폐로 수행 후의 과도 에너지가 최소가 되는 시점이다. 왜냐하면, 큰 과도 에너지는 계통의 안정도를 약화시키고 계통의 진동을 증가시키기 때문이다[3-4]. 최적 재폐로 기법은 재폐로에 의한 계통에 가해지는 충격을 줄일 수 있고, 과도 안정도를 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 먼저 세 가지 다른 자동재폐로 기법을 기술하였다. 첫 번째는 고장 선로의 전압 파형을 이용하여 영

구고장과 일시고장을 구분하고, 2차 아크 소호시간을 추정하는 기법이다. 두 번째는 과도 에너지 함수를 이용한 최적 재폐로 기법이다[5-6]. 세 번째는 최적 재폐로시간을 순차 재폐로의 지연시간으로 사용한 기법이다. 그리고, 이와 같은 세 가지 자동 재폐로 기법에 기초하여, 실시간 과도 안정도 평가에 의한 적응 재폐로 알고리즘을 제안하였다. 제안된 재폐로 알고리즘은 EMTP MODELS를 이용하여 구현하였으며, 재폐로 계전기와 연계된 모델 계통에서 재폐로시의 안정도 변화를 시뮬레이션하였다.

2. 고장 종류와 자동재폐로

자동재폐로에서 영구고장과 일시고장의 구분은 매우 중요하다. 영구고장일 때의 재폐로는 계통의 안정도와 장비에 심각한 손상을 야기할 수 있지만, 일시고장일 때의 재폐로는 계통 안정도와 전력 공급 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 따라서, 고장 종류에 관계없이 일정한 무전압시간이 지난 후에 재폐로를 수행하는 기존의 재폐로 방식은 계통의 안정도와 신뢰성에 위협을 초래할 가능성이 있다.

성공적인 재폐로 수행을 위해, 단상 자동재폐로 수행 시 차단된 상의 전압 파형을 이용한 가변 무전압시간 제어 기법으로 영구고장과 일시고장을 구분하고, 2차 아크 소호시간을 추정할 수 있다[1]. 일시고장에 의해 선로가 차단된 후 2차 아크가 소호 되면, 건전상과의 용량성과 유도성 결합에 의해 차단 상의 전압이 상승하게 되고, 이러한 전압 상승을 검출하여 고장종류와 2차 아크 소호시간을 추정할 수 있다. 그리고, 단상 재폐로뿐만 아니라 2회선 선로의 3상 재폐로 수행 시에도 이웃한 선로와의 용량성과 유도성 결합에 의해

* 準 會 員 : 成均館大 工大 情報通信工學部 博士課程
 ** 正 會 員 : 成均館大 工大 情報通信工學部 教授 · 工博
 接受日字 : 2003年 8月 5日
 最終完了 : 2003年 10月 26日

단상에서의 유사한 전압 파형이 발생한다[2]. 따라서, 본 논문에서는 단상 재폐로에서 뿐만 아니라, 2회선 선로의 3상 재폐로 수행 시에도 전압 파형을 이용하여 고장종류와 2차 아크 소호시간을 추정하는 방법을 사용하였다.

3. 최적 재폐로시간

일반적으로, 일시고장이 발생하였을 때 재폐로시간이 짧을수록 계통의 안정도 향상에 도움이 된다고 믿어지고 있다. 하지만, 빠른 재폐로가 항상 과도 안정도 향상에 도움이 되지 않는다고, 재폐로 후의 과도 에너지가 최소가 되는 시점이 과도 안정도를 위한 최적 재폐로시간이 된다[4]. 왜냐하면, 과도 에너지가 크면 계통의 안정도를 약화시키고 진동을 증가시키기 때문이다. 대기 계통의 재폐로 전의 과도 에너지와 재폐로 후의 과도 에너지는 참고문헌 [4]에 자세히 기술되어 있다. 1기 무한모선 계통(OMIB, One Machine Infinite Bus)에서 고장 제거 후의 과도 에너지는 다음 식 (1)과 같다[3,7].

$$V_f = V_k + V_p \tag{1}$$

$$= \frac{1}{2} M\omega^2 - P_m(\delta - \delta_s) - P_e(\cos \delta - \cos \delta_s)$$

- 여기서, V_f : 고장 제거 후의 과도 에너지
- V_k : 고장 제거 후의 운동 에너지
- V_p : 고장 제거 후의 위치 에너지
- M : 발전기의 관성 상수
- ω : 고장 제거 후의 과도 에너지
- P_m : 발전기의 기계적인 입력
- P_e : 발전기의 전기적인 출력
- δ : 고장 제거 후의 발전기각
- δ_s : 고장 제거 후의 안정한 평형점

고장 제거 후, 운동 에너지와 위치 에너지의 합인 과도 에너지는 일정한 값을 가지고, 시간에 따라 운동 에너지와 위치 에너지의 에너지 교환이 일어난다. 재폐로 수행 직전의 운동 에너지는 다음 식 (2)와 같다.

$$V_k = V_f + P_m(\delta_{RC} - \delta_s) + P_e(\cos \delta_{RC} - \cos \delta_s) \tag{2}$$

여기서, δ_{RC} 는 재폐로 직전의 발전기각 이다. 재폐로 수행 후의 과도 에너지는 다음 식 (3)과 같다.

$$V_{RC} = V_k - P_m(\delta_{RC} - \delta_{sRC}) - P_{eRC}(\cos \delta_{RC} - \cos \delta_{sRC}) \tag{3}$$

여기서, V_{RC} 는 재폐로 후의 과도 에너지이고, P_{eRC} 는 재폐로 후의 전기적인 출력이고, δ_{sRC} 는 재폐로 후의 안정한 평형점이다.

식 (2)를 식 (3)에 대입하여 정리하면 다음 식 (4)와 같다.

$$V_{RC} = V_f - P_m(\delta_s - \delta_{sRC}) - P_e \cos \delta_s + P_{eRC} \cos \delta_{sRC} + (P_e - P_{eRC}) \cos \delta_{RC} \tag{4}$$

식 (4)의 과도 에너지 V_{RC} 이 최소가 되는 시점이 최적 재폐로시간이 된다. 재폐로 순간에 δ_{RC} 를 제외한 다른 변수들은 고정된 값을 가지고, V_{RC} 는 발전기각 δ_{RC} 에 의해 결정된다. 고장 발생 시 재폐로 후의 전기적인 출력 P_{eRC} 은 재폐로 후의 전기적인 출력 P_e 보다 크기 때문에, δ_{RC} 의 절대값이 최소가 될 때 V_{RC} 는 최소 값을 가진다. 시간영역과 P- δ 평면에서의 최적 재폐로시간은 각각 다음 그림 1(a), (b)와 같다.

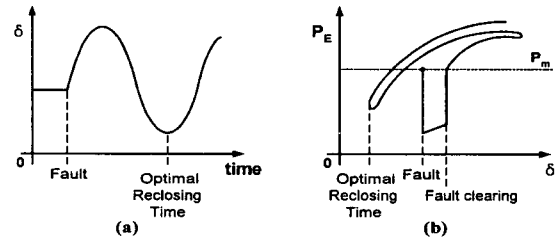


그림 1 OMIB에서의 최적 재폐로시간
(a)시간 영역 (b) P- δ 평면
Fig. 1 Optimal reclosing time in the OMIB system
(a) Time domain (b) P- δ plane

그림 1에서와 같이 최적 재폐로시간은 발전기각이 영을 지나지 않는 최소값이 되는 시점이다. 따라서, OMIB에서 최적 재폐로시간은 발전기각을 이용하여 쉽게 구할 수 있고, 그 알고리즘은 다음 그림 2와 같다. 그림 2의 ①에서 $\delta[n]$ 과 $\delta[n-1]$ 의 차는 LPF(Low Pass Filter)를 거쳐, 발전기 각속도 $\omega[n]$ 이 되고, 최적 재폐로시간은 발전기 각속도의 부호가 음에서 양으로 변화할 때이다. 이와 같은 방법은 확장 등면적법(EEAC, Extended Equal Area Criterion)을 이용하여 대기 계통으로 확장하여 적용할 수 있다[8,9].

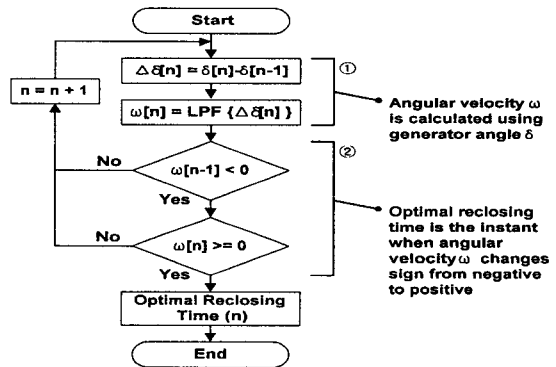


그림 2 최적 재폐로시간을 구하는 순서도
Fig. 2 Flow chart to find the optimal reclosing time

4. 순차 재폐로(Sequential Reclosure)

순차 재폐로는 고속 재폐로 수행 시 터빈 발전기 축에 인가되는 비틀림 토크(torsional torque)를 감소시키기 위해 제안되었다. 삼상 재폐로 수행 시, 첫 번째 상은 t_1 에 재폐로하고 두 번째와 세 번째 상은 각각

($t_1+\Delta t$)와 ($t_1+2\Delta t$)에 재폐로 한다. 여기서 Δt 는 지연시간이다 [5]. 순차 재폐로는 발전기 축의 비틀림 토크의 감소에 효과적인 방법이고, 재폐로시간에 따라 최대 비틀림 토크는 달라지게 된다[5]. 본 논문에서는, 과도 안정도 향상을 위해 최적 재폐로시간을 지연시간 Δt 로 사용하는 순차 재폐로를 사용하였고, 알고리즘은 다음 그림 3과 같다. 그림 3에서 첫 번째 상은 일정한 지연시간 후에 재폐로 되며, 나머지 두상은 최적 재폐로시점에 재폐로 된다. 첫 번째 상의 재폐로에 의해 FSU(First Swing Unstable)을 FSS(First Swing Stable)로 바꿀 수 있고, 순차 재폐로에 의해 재폐로에 의해 계통에 가해지는 충격을 분산시킬 수 있다.

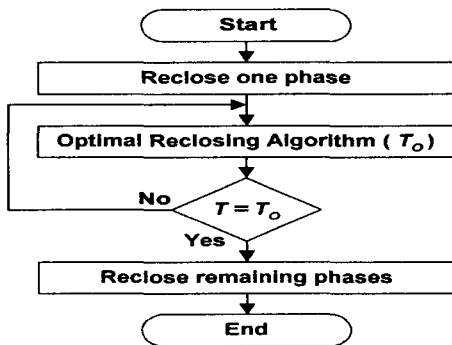


그림 3 최적 재폐로시간을 지연시간으로 사용한 순차 재폐로의 순서도

Fig. 3 Flow chart for the sequential reclosing using the optimal reclosing time as the time delay

5. 적응 재폐로 기법

5.1 FSS와 최적 재폐로시간

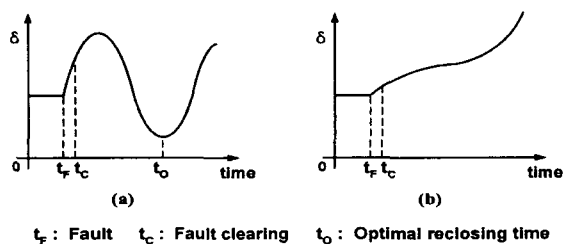


그림 4 FSS와 FSU일 때의 발전기각 (a) FSS (b) FSU
Fig. 4 Generator angle in the case of FSS and FSU (a) FSS (b) FSU

최적 재폐로시간은 재폐로 후의 과도 에너지가 최소가 되는 시점이다. FSS일 경우에는 발전기각이 진동함에 따라 재폐로 후의 과도 에너지도 역시 진동하게 되고, 진동 방향이 음에서 양으로 바뀌는 지점이 존재한다. 하지만, FSU일 때에는 재폐로 후의 과도 에너지는 단조 증가하게 되고 방향이 바뀌는 지점이 존재하지 않는다. 따라서, FSU에서는 재폐로를 빨리 수행할수록 재폐로 후의 과도 에너지는 작아진다. 식 (4)에서 재폐로 후의 과도 에너지는 재폐로 순간의

발전기각의 코사인 값에 반비례하고, FSS와 FSU일 때의 최적 재폐로시간은 그림 4와 같다.

5.2 Emergency EEAC를 이용한 실시간 과도 안정도 평가

EEAC은 EAC를 확장한 방법으로 먼저 발전기각들의 차이를 이용하여 대기 계통의 발전기들을 위험 발전기군(critical machines)과 나머지 발전기군(remaining machines)의 2 개의 그룹으로 나누어 각각의 그룹을 하나의 발전기로 축약한다. 그리고, 축약된 2기 계통을 다시 OMIB로 등가화한다. OMIB에서는 잘 알려진 등면적법을 사용하여 과도 안정도를 평가할 수 있다. EEAC에서 위험 발전기군과 나머지 발전기군은 발전기각들의 차이에 의해 나누어지기 때문에, 외란이 발생하고 일정 시간 후에 발전기각들의 차이가 커져야지만 과도 안정도를 평가할 수 있다. 즉, 기본적으로 EEAC은 실시간 과도 안정도를 평가하지 못한다. 하지만, Emergency EEAC은 발전기각의 속도를 이용함으로써 외란 발생 후 짧은 시간이 지난 후에 실시간으로 과도 안정도를 평가할 수 있다[11].

등가 OMIB에서 $P_A-\delta$ 곡선은 다음 식 (5)와 같다[12].

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_M - P_E = P_A = P + B \cos \delta + C \sin \delta \quad (5)$$

여기서, M 는 관성상수, δ 는 회전자 각, P_M 과 P_E 는 각각 기계적인 입력과 전기적 출력이고, P_A 는 가속 화력이다.

회전자 각 δ 을 실시간으로 측정할 수 있고 발전기의 관성 상수 M 을 미리 알고 있다고 하면, 파라미터 P, B, C 는 최소 자승법(least square method) 또는 커브 피팅 방법(curve fitting method)을 사용하여 구할 수 있고, 과도 안정도 평가를 위한 가속 영역과 감속 영역의 면적을 계산할 수 있다.

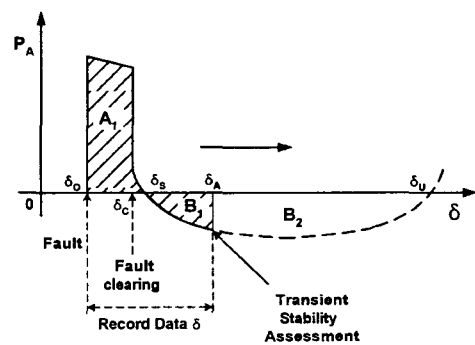


그림 5 과도 안정도 평가를 위한 emergency EEAC에서의 $P_A-\delta$ 곡선

Fig. 5 $P_A-\delta$ curve using emergency EEAC for transient stability assessment.

그림 5에서 발전기 각 δ 는 δ_0 에서 δ_A 까지 기록되고, 발전기 각이 δ_A 이 되는 순간에 면적 A_1 과 B_1 이 계산되고, 그림 5의 점선과 같이 최소 자승법으로 예상된 $P_A-\delta$ 곡선을

이용하여 B_2 를 계산한다. 만약, A_1 이 (B_1+B_2) 보다 크다면, 계통은 안정도를 잃게 된다.

5.3 적응 재폐로 알고리즘

가변 무전압시간 제어 기법을 사용하여 일시고장과 영구 고장을 구분할 수 있고, 2차 아크 소호시간을 정확하게 추정할 수 있다. 영구고장이 발생하였을 때는 재폐로를 차단하여 재폐로에 의한 2차 충격을 방지할 수 있으며, 2차 아크 소호시간을 추정하여 아크 소호 후 재폐로를 투입할 수 있다. 하지만, 2차 아크 소호시간과 최적 재폐로시간은 일치하지는 않고, 과도 안정도 향상을 위해서 재폐로시간은 2차 아크 소호시간보다는 크고, 최적 재폐로시간과는 일치해야 한다. 그리고, FSS일 때에는 최적 재폐로 시점에서의 재폐로 수행이 과도 안정도 향상에 도움이 되고, FSU시에는 4장에서 설명한 순차 재폐로 방식을 사용하여 동기를 유지시킬 수 있다. 고장 종류와 과도 안정도에 따라 재폐로 동작을 변화시키는 적응 재폐로 알고리즘은 다음 그림 6과 같다.

그림 6에서 ①의 T_V 는 2차 아크 소호시간이고 ②의 T_O 는 최적 재폐로시간이고, 블록 ③에서 실시간으로 과도 안정도가 평가된다. 평가된 안정도 마진이 양의 값을 가지면 타이머의 시간 T 가 T_V 보다 크고, T_O 와 일치하는 순간 재폐로가 수행하게 되고, 안정도 마진이 음의 값을 가지면 타이머의 시간 T 가 T_V 보다 클 때 4장에서 설명한 순차 재폐로가 블록 ④에서 수행된다.

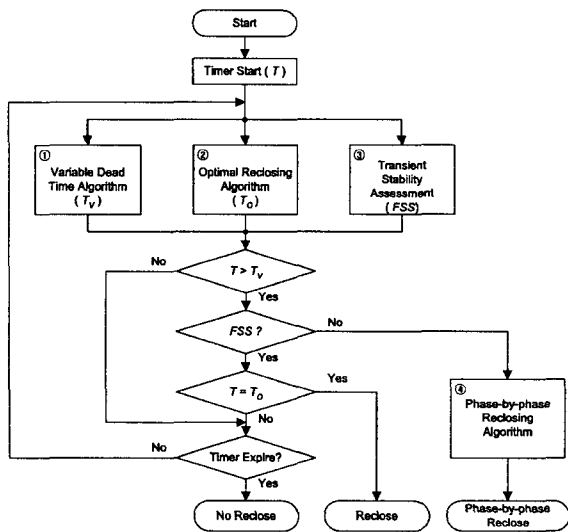


그림 6 적응 재폐로 알고리즘
Fig. 6 Adaptive reclosure algorithm

6. 시뮬레이션 결과

6.1 시뮬레이션 방법

시뮬레이션에 사용된 345[kV] 모델 계통은 다음 그림 7과 같다. BUS2에 올진 N/P를 모델링한 EMTP 동기기 모델과 변압기 모델을 연결하여 1기 무한모선 계통을 구성하고, 송전선로의 전체 길이는 100[km]이다. 제안된 적응 재폐로 알고리즘은 EMTP MODELS를 이용하여 구현하였다[13].

Aggarwal의 1차 아크 모델[1]과 2차 아크 모델[14]을 사용하여 선로상의 고장을 시뮬레이션하였다.

재폐로 계전기의 한 주기 당 샘플수는 12개로 하여, 기존의 재폐로 알고리즘과 제안된 적응재폐로 알고리즘을 시뮬레이션하고, 각각의 성능을 비교하였다. 기존의 재폐로 알고리즘은 한국전력공사(KEPCO)에서 사용하는 0.4초의 무전압 시간과 동기검정시의 위상차를 30°로 적용하였다.

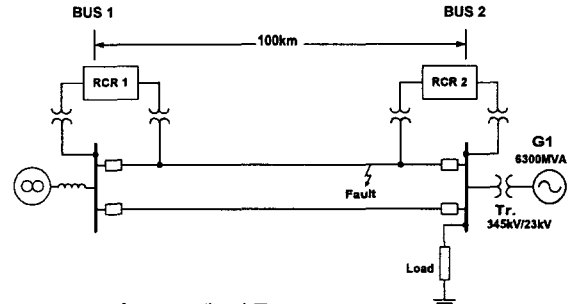


그림 7 모델 계통
Fig. 7 Model of power system

6.2 적응 재폐로 알고리즘

기존의 재폐로 계전기와 그림 6의 적응 재폐로 알고리즘을 적용한 계전기를 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 시작 2초 후에 2선 아크 지락고장이 발생하였다.

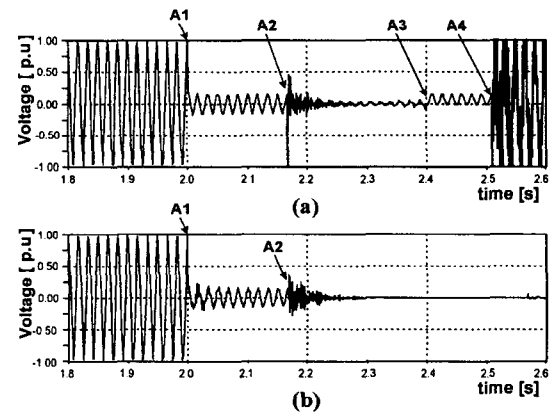


그림 8 일시고장과 영구고장일 때의 전압파형 (a) 일시고장 (b) 영구고장

Fig. 8 Voltage waveform when transient fault and permanent faults occur. (a) Transient fault (b) Permanent fault

적응 재폐로 알고리즘에서, 일시고장과 영구고장일 때 계전기 위치에서의 전압 파형은 그림 8과 같다. 그림 8의 A1에서 2선 아크 지락고장이 발생하여 고장이 검출되고, A2에서 차단기가 동작되고 3상의 선로가 차단되었다. 일시고장일 때는 그림 8(a)에서와 같이 2차 아크가 소호되는 A3지점에서 전압이 상승하고, 따라서 A4지점에서 재폐로 동작이 수행된다. 하지만, 영구고장일 때는 그림 8(b)에서와 같이 전압의 변화가 없으며, 그로 인해 재폐로는 수행되지 않는다. 이와 같은 전압파형은 참고문헌 [1]에서 보여주는 단상 재폐로에서의 전압파형과 매우 유사하다.

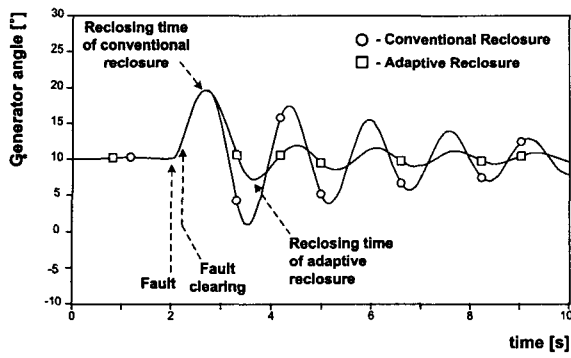


그림 9 고장제거 후 재폐로 하였을 때의 발전기 각 (발전기 초기각 10[°])

Fig. 9 Generator angle when the tripped line is reclosed after the fault clearing (Initial generator angle is 10[°])

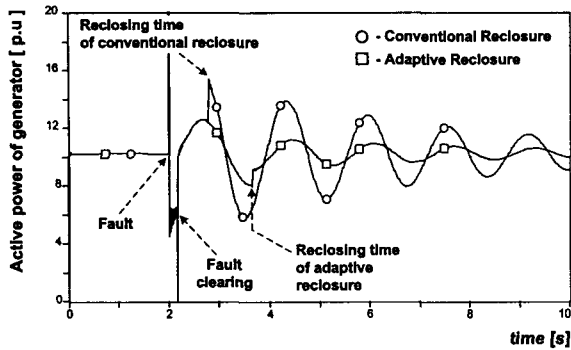


그림 10 고장제거 후 재폐로 하였을 때의 발전기 유효 전력 (발전기 초기각 10[°])

Fig. 10 Active power output of generator when the tripped line is reclosed after the fault clearing (Initial generator angle is 10[°])

초기 발전기 각이 10[°]일 때, 기존의 3상 재폐로 알고리즘과 그림 6의 적응 재폐로 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션한 발전기 각과 발전기 유효 전력의 변화는 그림 9-10과 같다. 기존의 재폐로 계전기는 선로가 차단되고 0.4초 후 재폐로가 수행되는 반면, 적응 재폐로 계전기는 1.5초 후 재폐로가 수행된다. 적응 재폐로의 무전압 시간이 기존 재폐로 무전압 시간보다 길어지지만, 이것은 다음과 같은 장점이 있다.

- (i) 성공적인 재폐로 가능성의 증가
- (ii) 재폐로에 의해 계통에 가해지는 충격의 감소

그림 10-11에서와 같이 적응 재폐로 알고리즘을 적용함으로써 발전기 각과 유효전력의 진동이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다.

초기 발전기 각이 30[°]일 때, 기존의 3상 재폐로 알고리즘과 적응 재폐로 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션한 발전기 각과 발전기 유효 전력의 변화는 다음 그림 11-12과 같다. 기존의 재폐로 계전기는 선로가 차단되고 1.68초 후 재폐로가 수행되는 반면, 적응 재폐로 계전기는 2.0초 후 재폐

로가 수행된다. 기존 재폐로 계전기의 무전압 시간 1.68초는 정격값인 0.4초 보다 길어진다. 이것은 고장이 제거되고 0.4초 후 동기검정 위상차가 30[°]를 넘어서고, 발전기 각의 진동에 의해 위상차가 30[°] 이내로 들어 왔을 때 재폐로가 투입되기 때문이다. 따라서, 동기검정 계전기는 재폐로에 의해 인가되는 계통의 충격을 완화시키며 과도 안정도 향상에 도움이 된다.

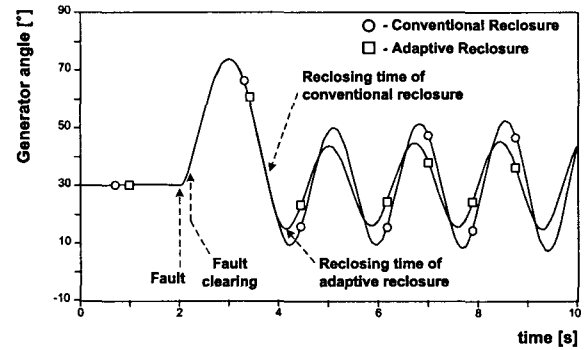


그림 11 고장제거 후 재폐로 하였을 때의 발전기 각 (발전기 초기각 30[°])

Fig. 11 Generator angle when the tripped line is reclosed after the fault clearing (Initial generator angle is 30[°])

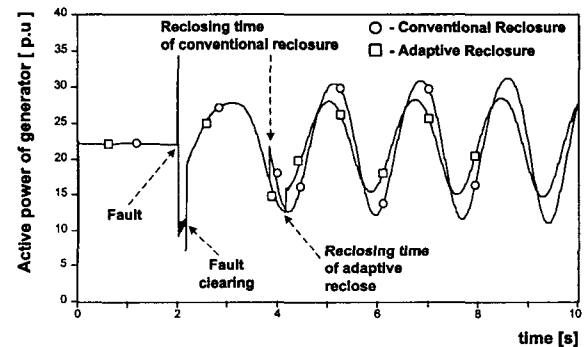


그림 12 고장제거 후 재폐로 하였을 때의 발전기 유효 전력 (발전기 초기각 30[°])

Fig. 12 Active power output of generator when the tripped line is reclosed after the fault clearing (Initial generator angle is 30[°])

초기 발전기 각이 35[°]일 때, 기존의 3상 재폐로와 최적 재폐로만을 적용하여 시뮬레이션한 발전기 각의 변화는 다음 그림 13의 곡선 1과 같다. 두 경우 발전기 각의 곡선은 동일하다. 왜냐하면, 두 경우 모두 FSU에서 재폐로 조건이 만족하지 않음으로 재폐로 동작이 수행되지 않기 때문이다. 따라서, 기존의 재폐로와 최적 재폐로에서 모두 동기를 잃고 불안정하게 된다. 고장 제거 후 재폐로 조건을 무시하고 재폐로를 수행할지라도, 곡선 2와 같이 FSS는 되지만 역시 불안정하게 된다. 순차 재폐로를 사용한 그림 6의 적응 재폐로 알고리즘을 도입함으로써 이와 같은 불안정을 방지할 수 있다.

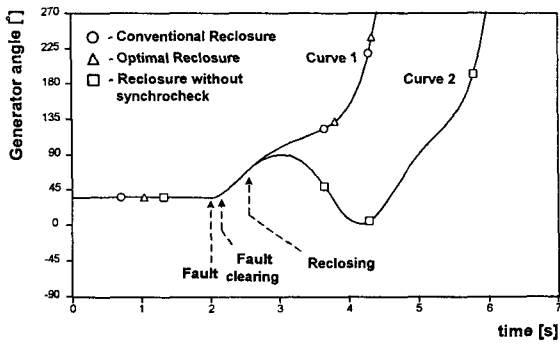


그림 13 고장제거 후 재폐로 하였을 때의 발전기 각 (발전기 초기각 35[°])
 Fig. 13 Generator angle when the tripped line is reclosed after the fault clearing (Initial generator angle is 35[°])

후의 시점에서 과도 안정도를 평가하고, FSU으로 예상되면 순차 재폐로를 수행한다. 순차 재폐로에서는 먼저 “a” 상을 재폐로한 후 “b”, “c” 상은 최적 재폐로 시점에서 재폐로한다. 그림 15-16에서와 같이 적응 재폐로 알고리즘을 사용함으로써 안정한 상태를 유지하는 것을 볼 수 있다.

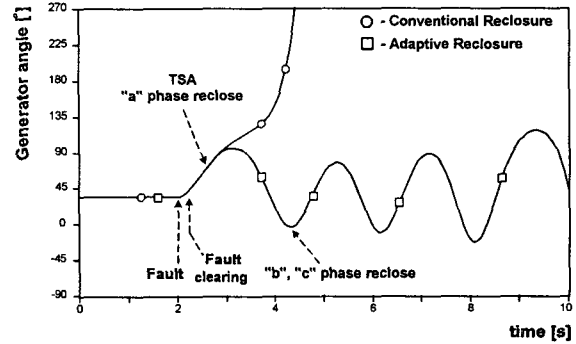


그림 15 고장제거 후 재폐로시의 발전기 각 (발전기 초기각 35[°])
 Fig. 15 Generator angle when the tripped line is reclosed after the fault clearing (Initial generator angle is 35[°])

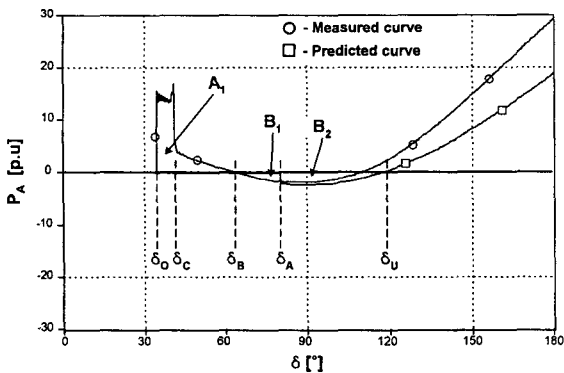


그림 14 고장발생 후 160[ms]에서 고장이 제거되었을 때의 측정된 P_A - δ 곡선과 예상된 곡선 (발전기 초기각 35[°])
 Fig. 14 Measured and predicted power angle curves when the fault is cleared 160ms after the fault (Initial generator angle is 35[°])

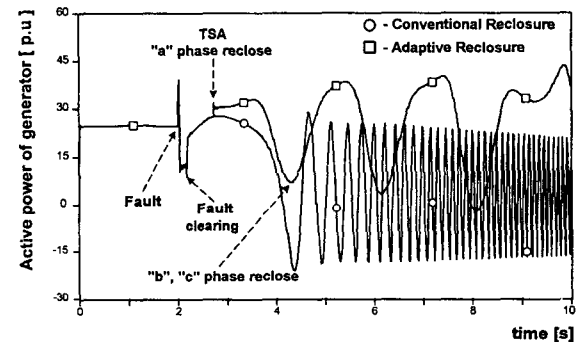


그림 16 고장제거 후 재폐로시의 발전기 각 (발전기 초기각 35[°])
 Fig. 16 Active power output of generator when the tripped line is reclosed after the fault clearing (Initial generator angle is 35[°])

FSU일 때는 발전기 각이 단조 증가하여 180[°]를 넘어 가게 되고, 발전기 각 변화의 방향이 바뀌는 지점이 존재하지 않게 된다. 따라서, 기존 재폐로와 최적 재폐로 알고리즘 모두에서 재폐로 동작 조건이 만족하지 않게 된다. FSU일 때는 순차 재폐로를 수행함으로써 발전기 각을 안정시킬 수가 있다. 먼저, FSS와 FSU를 구별하기 위해서 emergency EEAC를 사용하여 실시간으로 과도 안정도를 평가한다. FSU일 때의 측정된 P_A - δ 곡선과 예상된 곡선은 그림 14와 같다. δ_0 에서 δ_A 까지 발전기 각을 측정하여, δ_A 에서 P_A - δ 곡선을 예상하고 면적을 계산한다. 계산된 면적 A_1 은 126.1이며 면적 (B_1+B_2) 는 89.7로써 가속 영역의 면적이 더 크므로 FSU이다. 그림 9-10의 경우에는 $A_1=38.1$, $(B_1+B_2)=5421.3$ 이고, 그림 11-12의 경우에는 $A_1=87.8$, $(B_1+B_2)=489$ 로써 FSS이다.

초기 발전기 각이 35[°]일 때, 기존의 3상 재폐로 알고리즘과 그림 7의 적응 재폐로 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션한 발전기 각과 발전기 유효 전력의 변화는 다음 그림 15-16과 같다. 적응 재폐로에서는 고장제거 후 0.4초가 지난

7. 결 론

본 논문에서는 안정도 향상을 위한 적응 재폐로 알고리즘을 제시하였다. 이 재폐로 기법은 가변 무전압시간 제어, 최적 재폐로, 순차 재폐로를 포함하고, 고장 종류와 과도 안정도에 따라 적응적으로 동작하는 방법이다. 고장 종류를 판별하기 위해 가변 무전압시간 제어 기법을 사용하고, 실시간 과도 안정도 평가를 위해 emergency EEAC를 사용하였으며, 과도 안정도 향상을 위해 최적 재폐로, 순차 재폐로 방법을 사용하였다.

시뮬레이션 결과, 제시된 적응 재폐로 알고리즘을 사용함으로써, 계통의 진동이 감소하였고 외란 후에 발전기 각이 계속적으로 증가하는 심각한 불안정 상태에서도 계통의 안정도를 유지할 수 있었다.

감사의 글

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

참고 문헌

[1] S.P. Ahn, C.H. Kim, R.K. Aggarwal, A.T. Johns, "An Alternative Approach to Adaptive Single Pole Auto-Reclosing in High Voltage Transmission Systems Based on Variable Dead Time Control", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, pp. 676-686, Oct. 2001.

[2] R.K. Aggarwal, Y. H. Song, A.T. Johns, "Adaptive Three-phase Autoreclosure for Double-circuit Transmission Systems using Neural Networks", in Proc. 1993 IEE Advances in Power System Control, Operation and Managements Conf., pp. 389-392, 1993.

[3] Y.C. Yuan, Baohui.H. Zhang, W. Qinfang, "A Method For Capturing Optimal Reclosing Time of Transient Fault", in Proc. 1998 POWERCON Conf., pp. 18-21, Aug. 1998.

[4] Baohui.H. Zhang, Y.C. Yuan, Z. Chen, Z.Q. Bo, "Computation of Optimal Reclosure Time for Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 17, No. 3, pp. 670-675, Aug. 2002.

[5] A.M. El-Serafi, S.O. Faried, "Effect of Sequential Reclosure of Multi-phase System Faults on Turbine-Generator Shaft Torsional Torques", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, No. 4, pp. 1380-1388, Nov. 1991.

[6] Eissa. M.M., Malik. O.P., "Experimental Results of a Supplementary Technique for Auto-reclosing EHV/UHV Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17, No. 3, pp. 702 -707, Jul. 2002.

[7] A.A. Foud, V. Vittal, Power System Transient Stability Analysis using the Transient Energy Function Method, Vol. I, New Jersey: Prentice Hall, 1992, pp. 27-29.

[8] Vittal. V., Rajagopal. S., Fouad. A.A., El-Kady. M.A., Vaahedi. E., Carvalho. V.F., "Transient Stability Analysis of Stressed Power Systems using the Energy Function Method", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 1, pp. 239 -244, Feb. 1988.

[9] Wang. L., Klein. M., Yirga. S., Kundur. P., "Dynamic Reduction of Large Power Systems for Stability Studies", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 889 -895, May 1997.

[10] Yong-Beum Yoon, Tae-Kyun Kim, Jong-Ryul Won,

Jeong-Hoon Shin, Yong-Hak Kim, Seung-Tae Cha and Jin-Boo Choo, "Transient Stability Analysis using Large-Scale Real Time Digital Simulator", KIEE International Trans. on Power Engineering, Vol. 11A, No. 4, pp. 33-38, Dec. 2001.

[11] L.Y. Qun, Tenglin, L.W. Shun, L.J. Fei, "The Study on Real-Time Transient Stability Emergency Control in Power System", in Proc. 2002 IEEE CCECE Canadian Conf., Vol. 1, pp. 138-143.

[12] Xue Y, T.V. Cutsem, M.R. Pavella, "A Simple Direct Method for Fast Transient Stability Assessment of Large Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 2, pp. 400-412, May. 1988.

[13] 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.

[14] S. Goldberg, W.F. Horton, D. Tziouvaras, "A Computer Model of the Secondary Arc in Single Phase Operation of Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 586-594, Jan. 1989.

저 자 소 개



허 정 용 (許 禎 容)

1974년 12월 28일생. 2000년 성균관대 전자공학과 졸업. 현재 동 대학원 정보통신 공학부 박사과정, 차세대전력기술 연구센터

Tel : 031-290-7166

Fax : 031-290-7955

E-mail : rc1901@hanmail.net



김 철 환 (金 喆 煥)

1961년 1월 10일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 성균관대 정보통신공학부 교수, 차세대전력기술연구센터

Tel : 031-290-7124

Fax : 031-290-7179

E-mail : chkim@skku.edu