

송전계통 과도 안정도 향상을 위한 최적 순차 재폐로에 관한 연구

A Study on Optimal Sequential Reclosing to Improve Transient Stability in Transmission System

권 기 현* · 오 윤 식* · 박 지 경* · 조 규 정* · 손 승 현* · 김 철 환†

(Gi-Hyeon Gwon · Yun-Sik Oh · Ji-Kyung Park · Kyu-Jung Jo · Seung-Hyun Sohn · Chul-Hwan Kim)

Abstract - In transmission system, reclosing scheme is very useful method to improve continuity of power supply and reliability of system. Especially, high speed reclosing which is used generally in transmission systems has a benefit improving transient stability. However, the reclosing can jeopardize the stability under the condition having high difference of voltage phase angle between both ends. Thus, this paper proposes optimal sequential reclosing scheme to improve transient stability due to reclosing operation. The optimal sequential reclosing is that each phase is closed sequentially considering transient energy. In this paper, 345kV and 154kV transmission system is modeled using EMTP (ElectroMagnetic Transient Program) to verify the performance and effectiveness of optimal sequential reclosing on transient stability. Also, Integral Square Error(ISE) method is used to assess the transient stability.

Key Words : Auto reclosing, EMTP, ISE, Sequential reclosing, Transient energy function, Transient stability

1. 서 론

송전계통에서의 재폐로 방식은 전력 공급의 연속성과 전력시스템의 경제성 및 신뢰성을 향상시키는 효과적인 방식 중 하나로 널리 사용되고 있다. 특히 송전계통에서는 일시 고장의 비율이 높기 때문에 재폐로는 높은 효율을 가진다. 일시 고장 발생 시 빠르게 계통을 복구시키는 고속 재폐로의 경우 과도 안정도를 향상시키기 위해 사용될 수 있지만 영구고장의 경우 오히려 안정도를 더 악화시키는 결과를 초래한다[1-2]. 또한 고장 제거 후 양단에 높은 전압 위상차가 발생하는 경우 재폐로 동작은 계통에 악영향을 미칠 수 있다. 이러한 계통에 미치는 영향을 줄이면서 발전기 축에 비틀림 토크를 감소시키고 또한 과도 안정도를 효과적으로 향상시킬 수 있는 방법으로 순차 재폐로 방식이 제안되었다[3]. 순차 재폐로는 3상을 동시에 재폐로 하지 않고 지연시간을 가지면서 각 상을 재폐로하는 방식이다. 하지만 [3]의 연구에서는 순차 재폐로 방식과 과도 안정도 간의 관계 및 원리를 밝히기는 어려움이 있다. 이러한 순차 재폐로는 두 번째 상의 재폐로 시 과도 에너지를 고려하여 그 지연시간을 산정하는 방식으로 연구가 진행되었다[4]. 하지만 과도 안정도를 더욱 향상시키기 위해서는 모든 상에서 재폐로 시 과도 에너지가 고려되는 것이 요구되며, 또한 순차 재폐로와 과도 안정도 간의 관계를 분석하는 것이 필요로 된다. 추가

적으로 순차 재폐로 적용 시 송전 전압계급 등의 다양한 계통의 상태에 따른 과도 안정도에 미치는 영향이 논의되어야 한다.

본 논문에서는 순차 재폐로 시 각 상에서의 과도 에너지를 고려한 최적 순차 재폐로 방식을 제안하고 이 방식에 의해 과도 안정도가 향상되는 현상을 분석하였다. 송전 계통에서 재폐로 시 각 상마다 과도 에너지를 고려하여 최소의 전력각에서 투입하는 시점을 결정하여 동작하는 방식을 제안하고 최적 순차 재폐로 방식과 과도 안정도의 관계를 등면적법을 이용하여 설명하였다.

모의를 통한 최적 순차 재폐로 적용 시 과도 안정도를 평가하기 위해 안정도 평가 기법 중 Integral Square Error(ISE) 기법을 사용하였다. ISE는 계통의 안정여부를 판별할 뿐만 아니라 재폐로 후 변화하는 전력각이 정상상태로 빠르게 회복되는지 그 크기를 통해 알 수 있다[5-7]. ISE 기법을 이용하여 345kV 및 154kV 모델 계통에서 최적 순차 재폐로 방식이 가지는 안정도 향상 효과를 분석하였다. 모델 계통은 EMTP (ElectroMagnetic Transient Program)를 이용하여 실 데이터를 바탕으로 모델링되었고 고장 제거 후 발생하는 모션 양단간 전압 위상차를 가변시켜 가며 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 과도 에너지를 고려하여 투입 위상각의 변화에 따른 과도 안정도 평가 역시 수행되었다.

2. ISE를 이용한 과도 안정도 평가

2.1 과도 안정도

발전기 탈락, 선로 스위칭 동작, 고장 및 갑작스런 부하의 변동이 발생하면 동기기의 전력각이 동요하는 현상이 나타난다. 이 때 이러한 외란으로 인해 동기기가 새로운 정상상태의 전력각으로 돌아갈 수 있는 지 여부를 판별하는 것이 과도 안정도 평가이다[8]. 외란이 발생하게 되면 발전기의

* Dept. of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Korea

E-mail : hmwkim@hanmail.net

Received : June 13, 2013; Accepted : September 24, 2013

입출력 유효전력의 균형이 깨지게 되고 일정 범위내에서 유지되던 전력각이 동요한다. 계통이 안정한 경우 입출력 유효전력이 새로운 균형점에 도달하는 반면 불안정한 경우에는 전력각은 발산하고 동기를 잃게 된다. 계통의 안정도 평가를 이해하기 위해 다음 그림 1과 같은 단순화된 1기 무한 모선으로 구성된 송전계통을 이용할 수 있다[2].



그림 1 2회선으로 구성된 1기 무한 모선
Fig. 1 Single machine infinite bus composing double lines

그림 1의 1기 무한모선 송전계통을 이용하여 전원 측에서 무한모선으로 공급되는 유효전력을 구하면 다음 식 (1)과 같다.

$$P = \frac{|V_s||V_R|}{X_{line}} \sin\delta \quad (1)$$

여기서, X_{line} : 선로의 합성 리액턴스
 δ : 전력각(power angle)

그림 1의 2회선 중 1회선에 고장이 발생한 경우 식 (1)을 통해 전력각 곡선을 도식화하여 과도 안정도를 분석할 수 있고 이는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

그림 2의 상단에 나타난 세 곡선은 각각 고장 전, 고장

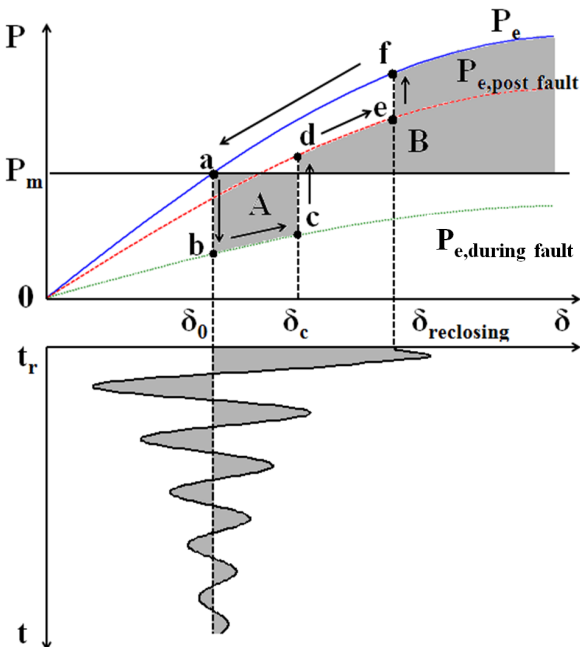


그림 2 고장 발생 시 전력-각 곡선과 재폐로 동작 후 전력각의 변화 곡선

Fig. 2 P- δ curves due to line fault and curve of power angle after reclosing

시, 그리고 고장 제거 후의 유효전력 곡선을 나타낸다. 1회선 고장 발생 시 선로의 토폴로지가 변화함으로써 식 (1)에 의해 유효전력이 감소하고 전력각은 초기각 δ_0 인 b에서 c로 증가하며 δ_c 에서 고장제거 후 회전자에 저장된 면적 A만큼의 가속에너지에 의해 전력각은 계속해서 증가한다. 계통이 안정한 경우 f에서 재폐로가 동작하면 전력각은 초기각인 a로 다시 돌아오게 되고 이 경우에는 면적 B가 면적 A보다 크게 된다. 반면 면적 A가 B보다 더 크게 되면 전력각은 초기각으로 돌아올 수 없고 계통은 불안정한 상태가 된다[2,8].

2.2 Integral Square Error(ISE)

시스템 성능의 공식화와 측정은 시스템의 파라미터 최적화와 최적 시스템 설계를 위해 필수적이다. 시스템 성능 평가 방법으로 시스템 성능 지수가 사용되고 ISE는 이러한 성능 지수 중 하나로 기준값과 목표로 하는 파형 사이에 발생하는 오차의 제곱에 대한 적분을 통해 산출되는 성능지수이다[5]. ISE 기법을 송전계통에서 외란으로 인한 전력각에 적용하게 되면 기준값은 초기 전력각이 되고 파형은 재폐로 후 나타나는 전력각 곡선이 될 수 있다. 이 경우의 ISE는 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다[6].

$$ISE = \int_{t_r}^{\infty} [\delta(t) - \delta_0]^2 dt \quad (2)$$

여기서, $\delta(t)$: 시간에 따른 전력각
 δ_0 : 초기 전력각
 t_r : 재폐로 동작 시점

식 (2)에서 $\delta(t)$ 와 δ_0 의 차이는 오차를 의미하고 이 오차를 제곱하여 적분하면 ISE를 구할 수 있다. 재폐로 동작 후 계통이 안정한 경우에는 전력각은 진동하는 파형을 가지며 초기 전력각으로 복귀하게 되고 이는 그림 2의 하단에 나타나는 파형과 같다. 이 파형과 초기 전력각 δ_0 의 차이의 면적은 그림에서 음영처리된 면적으로 나타나며 계통이 안정한 경우 이 면적은 점점 작아지기 때문에 ISE는 특정 값으로 수렴하는 파형을 가진다. 반면 불안정한 경우 $\delta(t)$ 는 증가하거나 계속해서 진동하는 파형을 가지기 때문에 ISE는 수렴하지 않고 계속해서 증가하는 값을 가질 것이다. 따라서 충분히 긴 시간동안 ISE의 값이 수렴하는지 또는 발산하는지 여부에 따라 송전계통의 안정도를 평가할 수 있고 안정한 경우에 대해 수렴한 값이 작을수록 전력각 곡선이 빠르게 복귀함을 의미하기 때문에 더 안정하다고 평가할 수 있다 [5-7].

3. 최적 순차 재폐로

3.1 기존의 순차 재폐로[3]

순차 재폐로는 고속 재폐로 수행 시 터빈 발전기 측에 인가되는 비틀림 토크를 감소시키고 과도 안정도를 향상시키는 기법이다. 3상을 동시에 재폐로 하지 않고 한 상씩 재폐로 함으로써 단상 재폐로의 효과를 가지기 때문에 발전기 측에 미치는 영향을 감소시킬 수 있다. 송전선로에 고장으로 인해 3상이 트립된 경우 무전압 시간 이후에 재폐로를

수행하게 된다. 순차 재폐로는 3상을 동시에 투입하는 대신 의도된 순서로 각 상별 지연시간을 가지고 순차적으로 재폐로가 수행되는 방식이다. 그림 3은 선로에 고장이 발생하여 차단기가 트립된 후의 순차 재폐로 동작을 나타낸다. 그림 3에서 a상을 먼저 t_R 에서 재폐로하고 Δt_1 의 지연시간을 가진 후 b상을 재폐로 한다. c상 또한 Δt_2 의 시간 지연 후 순차적으로 재폐로함으로써 계통을 복구시키게 된다.

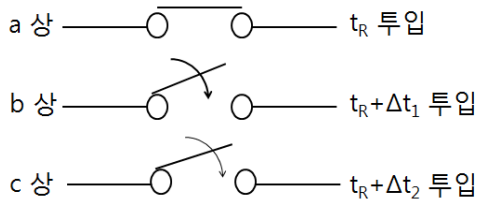


그림 3 순차 재폐로 동작 순서
Fig. 3 Operation sequence of sequential reclosing scheme

3.2 최적 순차 재폐로 방식

기존의 순차 재폐로 방식처럼 재폐로 되는 상의 투입시간을 고정하여 재폐로 하는 방식과는 달리 최적 순차 재폐로 방식은 투입시점을 고정하지 않고 과도 에너지를 고려하여 각 상을 투입시점을 결정하고 재폐로하는 방식이다[4]. 따라서 한 상을 재폐로 한 후 나타나는 전력각의 변동에서 최소의 과도 에너지를 갖는 시점을 찾는 것이 필요로 된다. 그림 1의 1기 무한모선 송전계통에서 고장 제거 후의 과도 에너지는 운동 에너지와 위치 에너지의 합으로써 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_f = V_k + V_p \tag{3}$$

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

- 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 : 발전기 회전자의 각 속도
- P_m : 발전기의 기계적인 입력
- P_e : 발전기의 전기적인 출력
- δ : 고장 제거 후의 전력각
- δ_s : 고장 제거 후의 안정한 평형점

식 (3)을 이용하여 재폐로 후의 과도 에너지를 구하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{RC} = V_k - P_m(\delta_s - \delta_{sRC}) - P_e \cos\delta_s \tag{4}$$

$$+ P_{eRC} \cos\delta_{sRC} + (P_e - P_{eRC})\cos\delta_{RC}$$

- 여기서, V_{RC} : 재폐로 후의 과도 에너지
- P_{eRC} : 재폐로 후의 전기적 출력
- δ_{RC} : 재폐로 직전의 전력각
- δ_{sRC} : 재폐로 후의 안정한 평형점

재폐로 동작 시 식 (4)에서는 δ_{RC} 를 제외한 다른 변수들은 고정된 값을 가지기 때문에 재폐로 후의 과도 에너지 V_{RC} 는 δ_{RC} 에 의해 결정된다. 재폐로 후의 전기적 출력은 재폐로 전의 출력보다 크기 때문에 식 (4)에서 90° 보다 작은 δ_{RC} 를 포함하는 마지막 항은 음의 값을 가지게 된다. 결과적으로 작은 δ_{RC} 에서 재폐로를 수행할수록 재폐로 후의 과도 에너지를 줄일 수 있다[9-10].

과도 에너지를 최소화함으로써 재폐로 시 발생하는 전력각의 동요를 감소시키고 전력각을 빠르게 정상상태로 회복하기 위해 최적 순차 재폐로는 각 상별로 최소의 전력각을 가질 때 재폐로를 수행하게 된다. 이 논문에서 제안하는 최적 순차 재폐로의 동작은 다음과 같이 정리 할 수 있다.

- a상을 먼저 재폐로 한 후 b상, c상 순으로 수행
- b상 재폐로 시 최소의 전력각을 가질 때 재폐로 수행
- b상 재폐로 후 동일한 방법으로 c상 재폐로 수행

최적 순차 재폐로는 기존의 순차 재폐로가 가지는 장점뿐만 아니라 과도 에너지를 고려하여 동작하기 때문에 기존의 3상 일괄 재폐로와 비교하여 과도 안정도 측면에서 유리한 이점을 가진다. 따라서 높은 안정도가 필요로 되는 일부 송전계통에서 고장 발생으로 인해 양단 모선 사이에 높은 전압 위상차가 발생했을 때 최적 순차 재폐로를 적용함으로써 송전계통의 안정도를 향상 시킬 수 있다. 그림 4는 최적 순차 재폐로 방식 적용 시 과도 안정도 여유가 증가함을 보여 준다.

그림 4는 각 상별로 전력-각 곡선을 나타낸 것으로 a상의 경우는 그림 2에서 상단의 곡선과 같은 형태를 나타낸다. 최적 순차 재폐로를 적용하여 a상을 먼저 재폐로 한 경우 그림 1의 전원에서 무한모선 측으로 공급되는 유효전력이 증가하기 때문에 a상의 각은 감소하게 된다. 고장이 발생하지 않은 1회선을 통해 3상은 평형상태를 유지하게 되어 b상 및 c상의 각 역시 감소하고 b상이 최소가 되는 시점에 b상을 재폐로를 함으로써 기존의 안정도 여유인 면적 B에서 b상의 전력-각 곡선에서 추가적인 안정도 여유인 면적 C가 나타나게 된다. 동일한 방식으로 c상이 재폐로 됨으로써 면적 C+D가 나타남으로써 종합적으로 최적 순차 재폐로

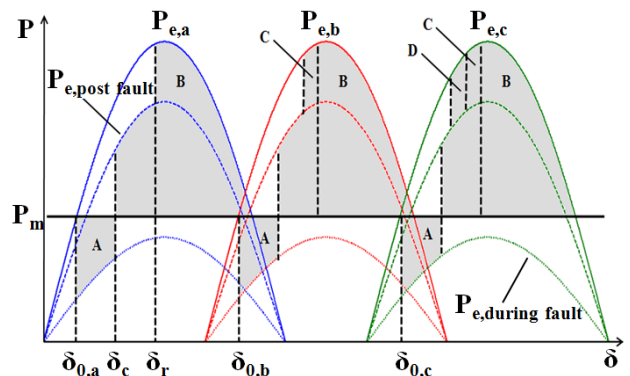


그림 4 최적 순차 재폐로 시 각 상별 전력-각 곡선
Fig. 4 Three-phase P-δ curves applying the optimal sequential reclosing

동작 시 안정도 여유가 증가하여 안정도가 향상됨을 그림 4를 통해 알 수 있다.

a상을 재폐로 한 후 변화하는 전력각을 감시하여 최소의 위상각을 가질 때 최적 순차 재폐로가 수행되어야 한다. 이러한 과정은 그림 5와 같이 나타낼 수 있다.

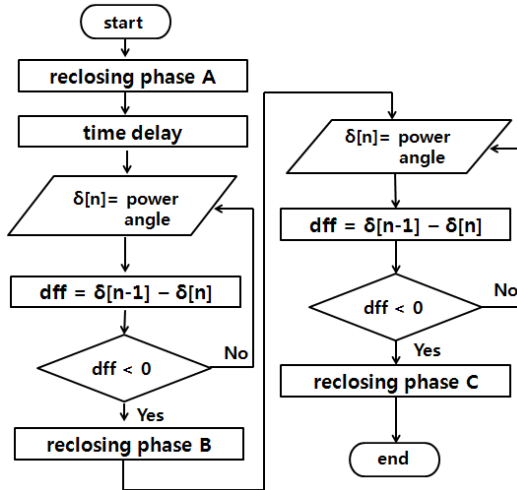


그림 5 최적 순차 재폐로 동작 순서도
Fig. 5 Flow chart of optimal sequential reclosing operation

그림 5는 최적 순차 재폐로의 동작 흐름도이다. a상이 재폐로된 후 두 모선 사이에 발생하는 전력각을 입력받고 실시간으로 그 차이를 구하여 dff에 입력한다. 전력각이 계속해서 감소하면 dff는 0보다 큰 값을 가지기 때문에 계속해서 전력각을 감시하게 되고 dff가 0보다 작은 값을 가지게 되면 전력각이 감소에서 증가로 바뀌는 시점이자 최소의 과도 에너지를 가지는 시점이기 때문에 b상을 재폐로 한다. 이 때 a상의 투입각에 따라 최소의 과도 에너지를 가지지 않는 변곡점이 나타날 수 있기 때문에 a상 투입 후 짧은 지연시간을 둘 수 있다. 이어서 c상 역시 b상과 동일한 방법으로 반복하여 최소의 전력각을 가질 때 재폐로를 함으로써 계통을 완전히 복구시킨다.

4. 시뮬레이션 및 결과 분석

4.1 모델 계통

제안된 최적 순차 재폐로 적용 시 송전계통의 안정도 향상을 분석하기 위해 EMTP를 이용하여 국내 345kV 및 154kV 송전계통을 모델링하였고 모델 계통은 그림 6과 그림 7과 같다.

그림 6에 나타난 345kV 송전계통은 612[MVA] 용량의 발전기 6기로 구성되고 각 모선 간에는 최소 2회선으로 구성되어있다. 선로는 실제 데이터를 바탕으로 분포 정수 모델이 사용되었으며 여자기 및 조속기가 포함 되었다. 그림 7에 나타난 154kV 송전계통은 246[MVA] 용량의 발전기 2기로 구성되었다. 그림 6과 그림 7에 나타난 모선 A와 B 그리고 모선 C와 D사이의 선로 데이터는 표 1과 같다.

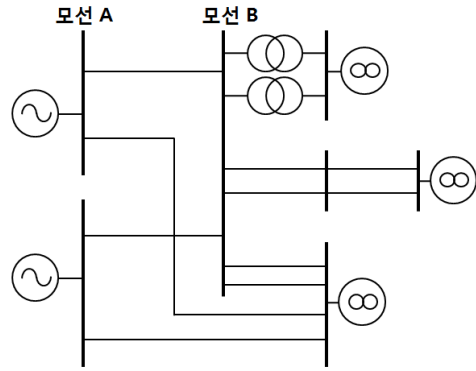


그림 6 345kV 송전계통 모델
Fig. 6 345kV transmission system model

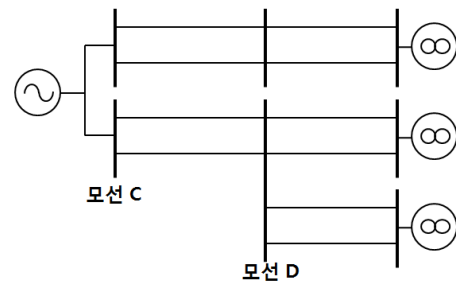


그림 7 154kV 송전계통 모델
Fig. 7 154kV transmission system model

표 1 모델 계통의 선로 파라미터

Table 1 Line parameters of transmission system model

선로	선로길이	파라미터	영상분	정상분
모선 A- 모선 B (345kV)	41.634 [km]	R[Ω/km]	0.144943	0.017439
		L[Ω/km]	2.375852	0.800798
		C[μF/km]	0	0.013982
모선 C- 모선 D (154kV)	28.535 [km]	R[Ω/km]	0.245513	0.041972
		L[Ω/km]	3.116442	0.879438
		C[μF/km]	0	0.012931

4.2 시뮬레이션 조건

그림 6과 그림 7의 모델 계통의 모선 A와 B간의 선로와 모선 C와 D 간의 선로에서 최적 순차 재폐로를 적용하여 EMTP를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이 논문에서는 차단기에 의해 고장이 제거 된 후 선행단이 먼저 재폐로 된 후의 상황을 가정하였다.

식 (4)에서 최소의 위상각을 가질 때의 재폐로 동작이 안정도를 가장 크게 향상시킴을 분석하였고 이를 검증하기 위해 a상이 재폐로 된 후 나타나는 전력각의 진동 파형에서 b와 c상을 다양한 투입 위상각에 따라 ISE를 측정하였다. 이 경우의 시뮬레이션 조건은 표 2와 같다.

선행단이 재폐로 된 후 양단에 나타나는 전압 위상차에

표 2 b와 c상 투입 위상각에 따른 시뮬레이션 조건

Table 2 Simulation conditions according to closing angles of phase b and c

case	b상 투입 위상각	c상 투입 위상각	모델계통	전압 위상차
1-1	1st 최소각	1st 최소각	345kV 송전계통	16°
1-2	2nd 최소각	2nd 최소각		
1-3	3rd 최소각	3rd 최소각		
1-4	4th 최소각	4th 최소각		
1-5	5th 최소각	5th 최소각		

다른 최적 순차 재폐로 적용 시 안정도 향상의 효과를 분석하기 위해 다음 표 3과 같이 두 송전 모델계통에서 다양한 전압 위상차에 따라 모의를 수행하였고 3상 일괄 재폐로 방식과 비교하였다. 이 때 ISE 측정은 충분히 수렴할 수 있도록 최적 순차 재폐로 수행 후 5초가 지난 시점에서 측정되었다.

4.3 시뮬레이션 결과 및 분석

최소의 위상각에서 재폐로 시 과도 에너지가 최소가 되기 때문에 최적 순차 재폐로는 a상을 재폐로 한 후 최소의 위상각에서 남은 두 상을 순차적으로 재폐로 하는 방식이다. 이 때 다양한 위상각에서 최적 순차 재폐로를 수행하여 ISE를 비교하였다. 그림 8은 a상이 재폐로 된 후 나타나는 전력각 곡선으로 그림에 나타난 것과 같이 진동을 하는 파형을 가진다. 이 때 각 진동마다 최소 위상각 지점을 표 2에서 분류한 것과 같이 Case 1-1에서 1-5로 구분 할 수 있다. 위상각의 크기는 Case 1-1이 가장 작고 Case 1-5가 가장 크다. 이 때 Case1-1 앞에 나타나는 최소 변곡점은 a상의 투입각에 따라 다르게 나타나기 때문에 그림 5의 시간지연을 통해 제외되었다.

표 3 전압 위상차에 따른 시뮬레이션 조건

Table 3 Simulation conditions according to difference of voltage phase angle between both ends

모델 계통	case	전압 위상차 [deg]	모델 계통	case	전압 위상차 [deg]
345kV 송전계통	2-1	13	154kV 송전계통	3-1	10
	2-2	16		3-2	12
	2-3	19		3-3	14
	2-4	22		3-4	16
	2-5	25		3-5	18
	2-6	28		3-6	20
	2-7	31		3-7	22
	2-8	34		3-8	24
	2-9	37		3-9	26
	2-10	40		3-10	28

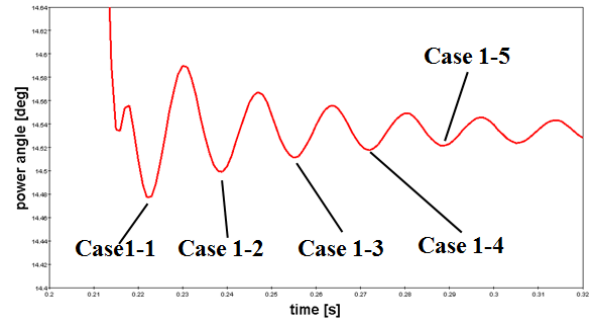


그림 8 a상 재폐로 후 전력각 곡선

Fig. 8 Power angle curve after reclosing of phase a

각 case에서 최적 순차 재폐로를 수행하였을 때 측정되는 ISE는 그림 9와 같다. 그림 9에서의 ISE값은 Case 1-1인 경우 가장 작고 Case 1-5로 갈수록 증가하였다. Case 1-1의 경우 가장 낮은 위상각에서 최적 순차 재폐로가 동작하여 재폐로 후에 발생하는 과도 에너지가 최소화되고 전력각이 빠르게 정상상태로 복귀하였기 때문에 다른 case에 비해 ISE값이 가장 작은 값을 가진다. 따라서 a상이 재폐로 된 후 첫 번째 전력각 진동에서 최소값을 가질 때 최적 순차 재폐로를 수행하면 안정도 향상에 더 효과적임을 알 수 있다.

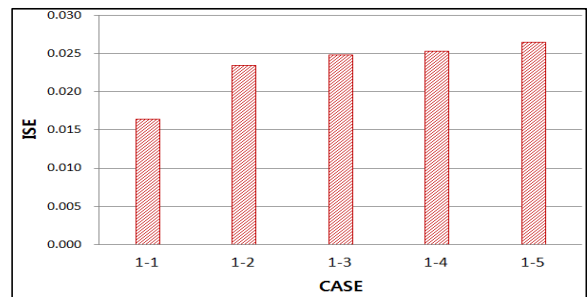


그림 9 최적 순차 재폐로 적용 시 투입 위상각에 따른 ISE

Fig. 9 ISE resulting from applying optimal sequential reclosing according to closing angles of phase b and c

그림 10은 345kV 모델 계통에서 최적 순차 재폐로를 적용하였을 때 ISE값을 측정한 것이다. 고장 제거로 인해 발생하는 양단간의 전압 위상차를 증가시켜 모의를 수행하여 ISE를 계산하였다. 전압 위상차가 증가할수록 계통이 안정도가 감소하기 때문에 ISE의 값 역시 증가하는 경향을 보였다. 기존의 재폐로 방식으로 3상을 동시에 재폐로 하는 3상 일괄 재폐로를 수행한 경우의 ISE는 최적 순차 재폐로의 경우보다 크게 나타났다. 이는 높은 전압 위상차에서도 최적 순차 재폐로 방식은 기존의 3상 일괄 재폐로 방식보다 과도 안정도를 크게 향상시킬 수 있음을 의미한다.

그림 11은 154kV 모델 계통에 최적 순차 재폐로 방식을 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 345kV 모델 계통에서의 결과와 유사하게 전압 위상차가 증가할수록 ISE값은 증가하는 경향을 보인다. 154kV 모델 계통에서도 3상 일괄 재폐로를 적용한 결과보다 최적 순차 재폐로를 적용한 경우의 ISE가 작음을 보인다. 따라서 최적 순차 재폐로의 과도 안정도 향상 효과를 154kV 모델 계통에서도 확인할 수 있

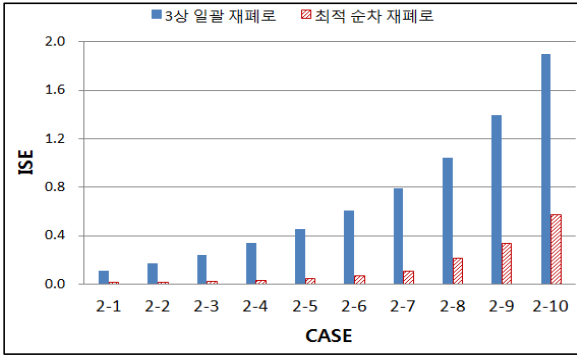


그림 10 345kV 송전계통에 최적 순차 재폐로 적용 시 전압 위상차에 따른 ISE 결과

Fig. 10 Simulation results of optimal sequential reclosing for 345kV transmission system according to difference of voltage phase angle between both ends

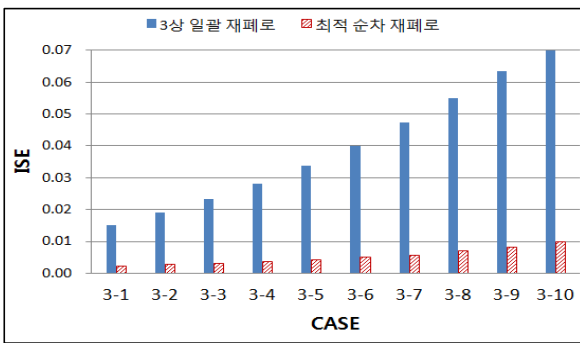


그림 11 154kV 송전계통에 최적 순차 재폐로 적용 시 전압 위상차에 따른 ISE 결과

Fig. 11 Simulation results of optimal sequential reclosing for 154kV transmission system according to difference of voltage phase angle between both ends

다. 154kV의 ISE가 345kV의 ISE보다 상대적으로 작게 나타났다. 이는 154kV 계통이 더 안정한 상태를 의미한다.

5. 결 론

본 논문에서는 최적 순차 재폐로 방식을 제안하고 과도 에너지와 과도 안정도 향상 측면에서 분석하였다. 또한 EMTP를 이용하여 345kV 및 154kV 모델 계통에 최적 순차 재폐로를 적용하여 그 결과를 분석하였다.

최적 순차 재폐로 방식은 재폐로 시 3상을 동시에 투입하지 않고 과도 에너지를 고려하여 각 상별 최소 위상각을 가질 때 투입하는 방식이다. 최적 순차 재폐로는 전력-각 곡선에서 나타나는 안정도 여유를 증가시킴으로써 과도 안정도를 향상시킬 수 있음을 보였다.

제안된 최적 순차 재폐로 방식 적용 시 과도 안정도 평가를 위해 ISE 기법을 도입하고 사용하였다. 재폐로 후에 나타나는 전력각이 정상상태로 도달하면 ISE값이 수렴하고 계통이 안정하다고 평가할 수 있으며 계통이 안정할수록 ISE

값이 작아지기 때문에 ISE의 크기를 이용하여 상대적으로 더 안정한지를 평가할 수 있다.

최적 순차 재폐로의 안정도 향상 효과를 검증하기 위해 EMTP를 이용하여 실제 송전계통 데이터를 바탕으로 345kV 및 154kV 모델 계통을 구성하였고 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과로 전압 위상차가 증가할수록 ISE가 증가하여 안정도가 감소하는 경향을 보였고 최적 순차 재폐로 적용 시 높은 전압 위상차에서도 3상 일괄 재폐로 방식보다 안정도가 크게 향상됨을 보였다. 최적 순차 재폐로 적용은 고장으로 인해 높은 전압 위상차가 발생 한 경우에도 과도 안정도를 크게 향상시킬 수 있기 때문에 높은 안정도를 요구하는 송전계통에 유용할 것이라 생각된다.

References

- [1] IEEE Guide for Automatic Reclosing of Circuit Breakers for AC Distribution and Transmission Lines, IEEE Standard C37.104-2012, July 2012.
- [2] Midwest Reliability Organization, Considerations for Transmission Reclosing Practices in the MRO Area, Technical Paper Version 1.0, 2009.
- [3] A. M. El-serafi, S. O. Faried, "Effect of Sequential Reclosure of Multi-Phase System Faults on Turbine-Generator Shaft Torsional Torques", IEEE Transactions on Power System, Vol. 6, No. 4, pp.1380-1388, 1991.
- [4] Jeong-Yong Heo, Chul-Hwan Kim, "An adaptive autoreclosure scheme with reference to transient stability for transmission lines", KIEE, Vol. 52A, No. 12, pp.698-704, 2003
- [5] Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, Modern Control Systems, Pearson International Edition, 2007, p. 303-305.
- [6] Rovnyak, S.M., "Integral square generator angle index for stability assessment," Power Engineering Society Winter Meeting, 2001., vol.3, pp.1052-1054 vol.3, 2001.
- [7] Guang Li, Rovnyak, S.M., "Integral square generator angle index for stability ranking and control," Power Systems, IEEE Transactions on, vol.20, no.2, pp. 926- 934, May 2005.
- [8] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, Thomas J. Overbye, Power System Analysis and Design fifth edition, CENGAGE Learning. 2010.
- [9] A. A. Foud, V. Vittal, Power System Transient Stability Analysis using the Transient Energy Function Method. Vol. I. New jersey: Prentic Hall, pp. 27-29, 1992.
- [10] 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.

저 자 소 개



권 기 현 (權 起 賢)

1985년 9월 3일생. 2012년 성균관대 정보통신공학부 졸업, 2012년~현재 성균관대 정보통신공학부 석사과정

Tel : 031-290-7166

Fax : 031-299-4137

E-mail : elysium03@hotmail.com



오 윤 식 (吳 潤 植)

1987년 7월 10일생. 2011년 성균관대학교 정보통신공학부 졸업, 2013년 동 대학원 정보통신공학부 졸업(석사), 2013년~현재 동 대학원 정보통신공학부 박사과정

Tel : 031-299-7166

Fax : 031-299-4137

E-mail : fivebal2@naver.com



박 지 경 (朴 志 景)

1985년 5월 16일생. 2012년 성균관대 정보통신공학부 졸업, 2012년~현재 성균관대 정보통신공학부 석사과정

Tel : 031-290-4630

Fax : 031-299-4137

E-mail : jikyungpark@gmail.com



조 규 정 (曹 圭 程)

1986년 12월 20일생. 2012년 성균관대 정보통신공학부 졸업, 2012년~현재 성균관대 정보통신공학부 석사과정

Tel : 031-290-4630

Fax : 031-299-4137

E-mail : thug1220@naver.com



손 승 현 (孫 承 賢)

1986년 11월 04일생. 2012년 성균관대 정보통신공학부 졸업, 2012년~현재 성균관대 정보통신공학부 석사과정

Tel : 031-299-4630

Fax : 031-299-4137

E-mail : sons88@hanmail.net



김 철 환 (金 喆 換)

1961년 1월 10일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업, 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 현재 성균관대 정보통신대학 교수, 전력IT인력양성센터 센터장

Tel : 031-290-7124

Fax : 031-299-4137

E-mail : hmwkim@hanmail.net