

# 전력설비 피해 감소를 위한 지능형 재폐로방식에 관한 연구

(Intelligent Reclosing Scheme to reduce a Damage of Power Equipments)

임성정\* · 김재철\*\*

(Seong-Jeong Rim · Jae-Chul Kim)

## 요 약

본 논문은 전력설비 피해 감소를 위한 배전시스템의 지능형 재폐로방식을 제안하였다. 재폐로 시도횟수를 늘릴 수록 공급신뢰도는 향상될 수 있지만, 전력설비에는 사고전류에 의한 충격이 누적된다. 제안된 방식은 사고전류의 크기에 따라 재폐로 시도횟수와 무전압시간을 결정하여 배전시스템 공급신뢰도를 유지하면서 전력설비의 피해를 감소시킬 수 있다. 사례연구에서는 현장 운전 데이터를 사용하여 제안된 지능형 재폐로방식에 대한 효율성을 입증하였다.

## Abstract

This paper presents an intelligent reclosing scheme to reduce a damage of power equipments in power distribution systems. As the number of reclosing shot increases, a power supply reliability is improved, but an impact of electric facilities by fault currents is accumulated. The proposed scheme determines the number of reclosing shots and its intervals according to the magnitude of fault current. Therefore, this scheme reduces a harm of electric facilities, and maintains the power supply reliability. Case studies is performed to verify the effectiveness of the proposed scheme using field operation data.

## 1. 개 요

산업화와 더불어 인구의 도시 집중화현상이 두드러지면서 수용가측 전력수요가 집중부하 형태로 변화되어 전력설비도 대용량화 추세이다. 이에 전력회사에서는 공급신뢰도 향상을 위하여 다중 재폐로방식을 채용하고 있다. 재폐로방식은 영구정전을 줄이는데 효과적이지만, 사고가 제거되지 않은 상태에서 차단기의 재투입은 재폐로 실패로 이어지면서 반복

된 높은 고장전류가 전기설비에 유입되어 큰 충격을 주게 된다[1]. 신뢰도 측면에서 기존 재폐로방식은 재폐로 시도횟수를 늘릴수록 재폐로 성공률이 증가하게 되므로 영구정전을 줄이게 되어 공급신뢰도가 향상된다고 볼 수 있다. 그러나 재폐로 시도횟수의 증가는 전력설비가 고장전류에 노출되는 회수가 증가하여 설비의 충격에 의한 스트레스가 누적되게 된다. 이에 따라 전력설비의 충격을 감소하기 위한 새로운 재폐로방식이 요구된다.

배전시스템의 재폐로방식에 관한 연구는 크게 경험적인 접근법과 해석적인 접근법으로 분류할 수 있다. 경험적인 접근법으로 L. Johnston[2]은 전기설비

\* 정회원 현대중공업 기전연구소 선임연구원

\*\* 정회원 숭실대학교 전기공학과 교수

접수일자 : 2000년 1월 8일

의 충격을 줄이기 위해서 재폐로 시도횟수를 줄이고 재폐로 시간간격을 늘리는 재폐로방식을 제안하여 재폐로 성공률을 향상시켰다. 그러나 이 접근법은 직관적이고 경험적인 통계를 사용함으로써 일반성을 가지지 못한다. R. G. Coney[3]는 시골지역에 다중 재폐로방식을 제안하였다. 이 방식은 전기수리공이면 사고지역에 도착하기 전에 사고상태를 확인하기 위해서 차단기를 재투입함으로써 재폐로가 성공하면 사고가 복구된 것으로 볼 수 있다. R. Ramon[4]은 대부분의 사고가 거주자의 반달리즘(vandalism)에 의해 주상변압기 2차측에서 발생하기 때문에 주상변압기 2차측에 재폐로장치의 설치를 제안하여 사고영향의 감소뿐만 아니라 재폐로 효율을 향상시켰다. 해석적인 접근법으로 C. M. Warren[5]은 순간정전을 줄이기 위해서 FSR(Feeder Selective Relaying)을 적용하지 않는 경우의 신뢰도 지수의 영향을 분석하였다. 이 분석에서는 재폐로장치 설치개수를 늘릴수록 신뢰도가 향상됨을 입증하였다. 그러나 재폐로방식의 변경과 전력설비 충격에 대해서는 고려하지 않았다. 김재철[6]은 전력용 변압기의 재폐로에 의한 충격 누적효과를 분석하였다. 이 분석에서는 재폐로 시도횟수의 증가가 반복적인 전기적인 충격으로 인해서 전력용 변압기의 수명을 감소함을 입증하였다. A. P. Apostolov[7]은 과부하된 차단기를 보호하기 위한 지능형 재폐로방식을 제안하였다. 이 방식은 사고전류의 크기에 따라 재폐로 시도횟수를 변경한다. 그러나 이 연구에서는 충격감소에 대한 정량적인 평가가 이루어지지 않았다. 재폐로 성공을 위한 재폐로 무전압시간의 결정은 주로 사고종류, 사고전류의 크기, 사고 정정시간, 기후 등에 영향을 받기 때문에 정의되지 않는다[8]. 그러나 긴 무전압시간은 배전선로의 방전(de-energizing)을 유도하여 영구정전의 발생확률을 줄이기 때문에 재폐로 성공률을 좀더 향상시킬 수 있다.

본 논문은 전력설비 피해를 감소하기 위한 지능형 재폐로방식을 제안하였다. 제안한 방식에서는 사고가 발생한 경우 적정 재폐로 시도횟수와 무전압시간을 결정하기 위하여 사고전류의 크기를 사용하였다. 제안된 재폐로방식의 효율을 검증하기 위해서 신뢰도 지수와 전력설비 충격지수를 사용하여 평가하였으며, 한전 배전계통에서 사용중인 기존 방식과 비교하였다. 제안된 방식은 기존 방식과 비교하여 전력설비

수명을 향상시킬 수 있음을 입증하였다.

## 2. 배전시스템에서의 재폐로방식

전력선 사고는 낙뢰, 스위칭 켜지, 동물 및 외부적인 영향에 의한 일시적인 사고가 대부분을 차지한다. 재폐로방식은 영구정전이 되기 전에 자동적으로 사고지역을 복구하기 위한 보호방식이다. 재폐로방식의 특징을 조사하기 위해서 전형적인 배전시스템의 구성을 그림 1에 나타내었다. 일반적으로 변전소 전력용 변압기 모션에는 여러 개의 피더가 연결되어 있고 주상변압기나 패드마운드 변압기 2차측을 통해 수용기측 부하가 연결되어 있다.

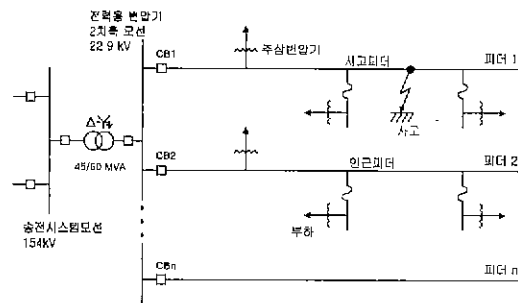


그림 1. 전형적인 배전시스템 구성도  
Fig. 1. Typical radial distribution system.

그림 1에서 피더 1에 사고가 발생한 경우, 재폐로 계전기를 가진 차단기(CB1)가 트립하여 선로의 전원을 끊은 후 짧은 재폐로 시간간격 경과후 다시 재투입한다. 이때 재투입후에 선로에서 사고전류가 탐지되지 않는 경우에는 지속적으로 전력공급이 된다. 반대로 CB1에서 사고전류를 탐지한 경우 다시 차단기를 트립한 후 일정시간 경과후 다시 재투입을 시도한다. 만일 두 번째 재투입한 경우에도 선로에서 사고전류를 탐지하면 피더를 영구적으로 트립된다. 이러한 재폐로 책무에서 2번의 사고전류가 전력용 변압기에 흐르게 되어 변압기 충격이 누적되어진다. 한전계통의 가공선로에서는 70[%]이상이 2회 재폐로방식을 채용하고 있다. 채용된 방식에서 재폐로 시간간격은 각각 0.5초와 15초이다.

### 3. 재페로 효과의 평가

#### 3.1 신뢰도의 평가

신뢰도지수의 선정은 배전시스템의 신뢰도를 적절히 평가하는데 매우 중요하다. 기존의 신뢰도지수는 영구정전회수와 정전시간을 기초하였기 때문에 재페로에 의한 정전기간의 평가는 쉽지 않다. 본 논문에서는 재페로의 효과를 평가하기 위하여 신뢰도 해석에 널리 사용되는 시스템 평균 정전회수(SAIFI: System Average Interruption Frequency Index)을 사용하였다[5]. SAIFI는 식(1)에 나타내었다.

$$SAIFI = \frac{\text{정전에 영향받은 수용가수}}{\text{총 수용가수}} = \frac{\sum_{i=1}^{NF} \lambda_i N_i}{\sum_{i=1}^{NF} N_i} \quad (1)$$

여기서,  $N_i$  :  $i$ 번째 피더의 수용가 수  
 $NF$  : 주변압기에 연결된 총 피더수  
 $\lambda_i$  :  $i$ 번째 피더의 사고율

SAIFI 지수는 재페로 시도시 재페로 성공률을 반영할 수 없기 때문에  $j$ 번째 재페로의 영향을 고려하기 위해서 SAIFI지수를 SAIFI( $j$ )로 수정하였다. 이 지수는 식(2)에 나타내었으며, 재페로 시도횟수와 재페로 성공율의 영향을 고려할 수 있다.

$$SAIFI(j) = SAIFI(0) \times \left( 1 - \sum_{j=1}^{NRC} R_s(j) \right) \quad (2)$$

여기서, NRC : 재페로 시도횟수  
 $R_s(j)$  :  $j$ 번째 재투입시 재페로 성공률

식 (2)에서 SAIFI(0)은 재페로가 적용되지 않았을 경우의 SAIFI 지수값을 의미한다. 본 논문에서 정전에 영향을 받는 수용가수는 사고피더에 연결된 수용가로 가정하였다. 왜냐하면 사고 피더의 수용가만이 피더의 재페로 계전기에 의해서 차단, 복구되기 때문

이다. 일반적으로 재페로 시도횟수  $j$ 가 증가한다면 재페로 성공률(RS)도 증가하게 된다. 즉 재페로 성공률이 증가하면 SAIFI는 감소하게 되며 신뢰도가 개선된다.

#### 3.2 전력설비 충격의 평가

차단기의 재투입에 대한 전력설비 충격의 평가는 재페로에 의한 장비의 피해정도를 평가하는 것이다. 장비의 피해를 정량적으로 표현하기 위해서 전력설비의 기능상 수명을 채택하였으며, 식(3)에 나타내었다 [6],[9-10].

$$L_k(\sigma_k, \gamma_k) = c_1 \sigma_k^{-c_2} \cdot \exp(-c_3 \cdot \gamma_k) \quad (3)$$

여기서,  $\sigma_k = 7.6 \times 10^{-5} \times i^2$  [psi]  
 $k$  :  $k$ 번째 사고에 의한 기계적 스트레스  
 $\gamma_k$  :  $k$ 번째 사고에 의한 노화계수 [pu]  
 $c_1$  : 설비 계수  
 $i$  : 순시전류 [A]

식(3)에서 기계적 스트레스는 사고전류의 크기의 제곱에 비례한다[10]. 사고전류의 크기와 지속시간에 대해서 설비의 수명과의 관계를 사용해서 식(4)와 같은 새로운 충격지수를 도입하였다. EFII (Electric Facility Impact Index)는 전력설비의 피해정도를 정량적으로 나타낸다.

$$EFII_k = \frac{D_k(\sigma_k, \gamma_k)}{L_k(\sigma_k, \gamma_k)} \quad (4)$$

식(4)에서 계수  $D_k$ 는  $k$ 번째 사고의 지속시간을 나타낸다. EFII의 누적값이 1이 된다는 것은 전력설비가 고장이라는 것을 의미한다. 따라서 EFII가 감소한다면 설비의 수명은 증가하게 된다.

### 4. 지능형 재페로방식

일반적으로 높은 사고전류는 전력설비에 좀더 큰 충격을 주며, 재페로 성공률도 감소하게 된다. 재페로 무전압시간의 증가는 설비의 충격에 대한 회복시

간을 늘려주며 재폐로 성공률도 증가시킬 수 있다. 전력설비와 민감부하의 피해를 줄이기 위해서 제안된 방식은 사고전류의 크기에 따라 적절한 재폐로 시도횟수와 시간간격을 결정한다. 이러한 기능을 구현하기 위해서 그림 2에 제안된 재폐로방식을 나타내었다.

제안된 방식의 구조에서 입력정보는 각상 전류와 차단기 상태로 구성되며, 출력정보는 재폐로 시도횟수 NRC와 재폐로 무전압시간 tRC로 구성된다. 그림 3은 적절한 NRC와 tRC를 선택한 제안된 방식의 간단한 예를 나타내었다. 그림에서 IF는 사고전류의 크기이며, IFMAX는 최대 사고전류의 크기를 나타낸다.

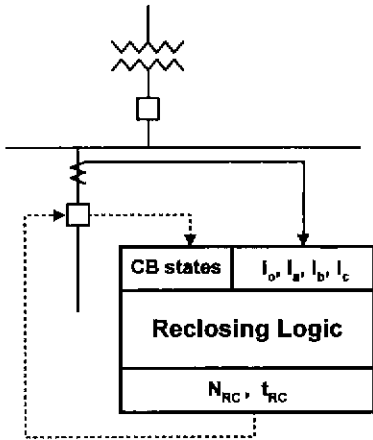


그림 2. 지능형 재폐로방식의 구조  
Fig. 2. Structure of an intelligent reclosing scheme.

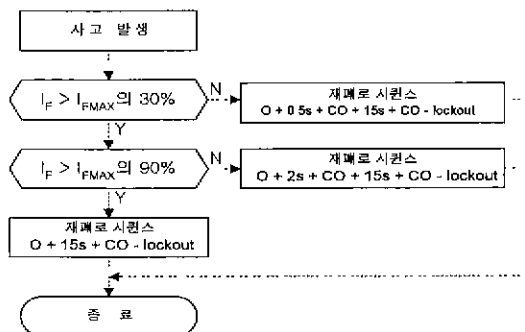


그림 3. 제안된 재폐로 책무의 예  
Fig. 3. An example of the proposed reclosing logic.

제안된 방식의 간단한 예에서 사고전류가 최대 고

장전류의 30%이하인 경우 2회 재폐로를 수행한다. 첫 번째 재폐로 무전압시간은 고속으로 0.5초이고 두 번째 재폐로 무전압시간은 저속으로 15초이며 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$O - 0.5초 - CO - 15초 - CO \quad (6)$$

여기서, O : 차단기 개방  
CO : 차단기 투입/개방

사고전류가 최대 고장전류의 30%에서 90%사이인 경우 2회 재폐로를 수행하며 첫 번째와 두 번째 재폐로 무전압시간은 각각 2초와 15초이다. 이러한 재폐로 책무는 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$O - 2초 - CO - 15초 - CO \quad (7)$$

사고전류가 최대 고장전류의 90%를 초과한 경우 1회 재폐로를 수행하며 첫 번째 재폐로 무전압시간은 15초이다. 이러한 저속 재폐로는 높은 사고전류에 의한 연속적인 충격을 제한하기 위한 것으로 재폐로 책무는 식(8)과 같이 표현할 수 있다.

$$O - 15초 - CO \quad (8)$$

변압기와 같은 전력설비의 피해는 사고전류의 크기에 직접적으로 비례한다. 비록 재폐로 성공률이 높다고 해서 재폐로 시도횟수를 늘린다면 전력설비의 충격은 증가하게 된다.

### 5. 사례연구

제안된 재폐로방식의 효율성을 검증하기 위해서 현장 운전데이터를 사용하여 공급신뢰도, 설비충격을 평가하였다. 그림 4에 나타난 단선도는 한전계통 J변전소의 단선결선도로서 본 사례연구를 위해서 사용하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 J변전소는 3대의 전력용 변압기와 4개의 송전선로, 20개의 배전선로로 구성되어 있다.

표 1은 4년(1991년-1994년)간 배전선로에서 발생한 사고에 대한 재폐로 시도횟수와 재폐로 성공횟수 기록데이터를 나타낸 것이다.

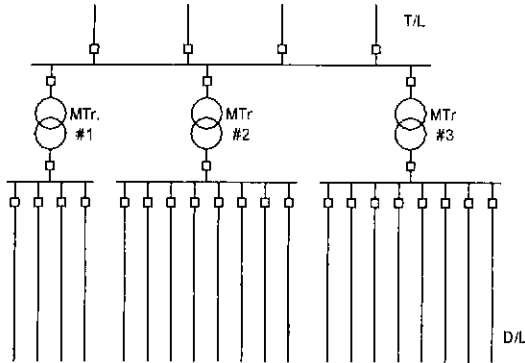


그림 4. 배전선로의 단선결선도 (J변전소)  
Fig. 4. An One-line diagram of the substation (J S/S)

표 1에서 재폐로 성공률 RS는 식(9)와 같이 계산하며 그 계산결과는 표 2에 수록하였다.

$$R_s = \frac{\sum \text{재폐로 성공횟수}}{\sum \text{재폐로 시도횟수}} \times 100 [\%] \quad (9)$$

표 1. J변전소에 운전기록 데이터  
Table 1. Recorded data for J substation.

뱅크	년 도	재폐로 횟수	재폐로 성공횟수	
			1번째	2번째
MTr. #1	1991	7	3	1
	1992	3	3	0
	1993	13	10	0
	1994	6	4	0
MTr. #2	1991	22	9	5
	1992	23	18	1
	1993	23	19	0
	1994	25	15	1
MTr. #3	1991	34	26	5
	1992	23	12	4
	1993	15	13	1
	1994	17	13	1
총계		211	145	19

표 2에서 보는 바와 같이 평균 재폐로 성공률은 첫 번째 재폐로에서 69.71[%], 두 번째 재폐로에서

8.45[%]이다. 4년간 평균 재폐로 성공률은 77.62[%]이다. 이 비율은 다른 변전소의 운전기록과 유사하기 때문에 이 현장데이터는 전형적인 한전 배전시스템을 표현한 것으로 볼 수 있다.

표 2. J변전소의 재폐로 성공률  
Table 2. The rate of successful reclosing.

년 도	재폐로 성공률 [%]		
	1번째	2번째	합 계
1991	60.32	17.46	77.78
1992	67.35	10.20	77.55
1993	82.35	1.96	84.31
1994	66.66	4.17	70.83
평균	69.17	8.45	77.62

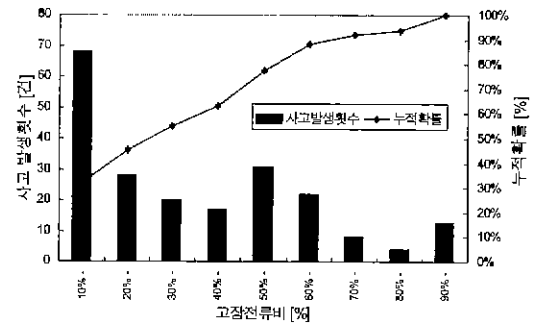


그림 5. 사고전류의 크기와 발생횟수  
Fig. 5. Magnitude and frequency of faults.

J변전소에 설치한 고장기록장치(fault recorder)로부터 취득한 고장전류 데이터는 그림 6에 나타내었다. 그림 5에서 막대그래프는 주변압기 2차측에서의 고장전류 크기별 발생횟수를 나타내며, 곡선은 사고 누적확률을 나타낸다. 그림 6에서 x축의 고장전류비는 최대 고장전류에 대한 비율을 나타내며, 그림에서 보는 바와 같이 최대 고장전류의 10[%]~20[%]사이의 사고 발생횟수가 30[%]이상으로 나머지 발생횟수에 비해서 많은 비율을 차지함을 알 수 있다. 그러나 이들 사고는 전력설비에 큰 영향을 주지 않지만, 고장전류의 90[%]이상의 사고의 경우 발생횟수는 적지만 전력설비에 큰 피해를 주게 된다. 또한 이러한 사고는 대부분이 영구사고로 이어지기 때문에 신뢰도에 큰 영향을 주지 않아서 이들 사고에 대해서 재폐로 투입을 제한하는 것이 전력설비 피해를 감소시키는 데 효과적이다.

평가를 위한 기준으로서, 앞에서 설명한 신뢰도 지수와 설비충격지수를 사용하였다. 신뢰도 평가는 재폐로 시도횟수에 따른 영구정전 발생횟수를 나타내는 SAIFI를 사용하였다. 전력설비의 피해 평가에 대해서 EFII 지수는 재폐로 시도횟수와 사고전류의 크기에 따른 변압기의 기능적 수명을 평가하는 데 적용한다. 평가 결과는 표 3에 수록하였다.

표 3. 재폐로방식별 평가지수 계산결과  
Table 3. Evaluation indices for each reclosing scheme.

평가지수	기존의 방식	제안된 방식
EFII	0.01697	0.01046
SAIFI	0.50	0.50

표 3에서 보는 바와 같이 기존 방식과 제안된 방식의 비교결과 EFII지수는 기존의 방식에 비해서 38%개선되었다. 결국 제안된 재폐로방식은 기존의 공급신뢰도를 유지하면서 전력설비충격을 개선할 수 있음을 입증하였다. 비록 개선된 값이 적다고 볼 수 있지만 그 영향은 상당하다.

## 6. 결 론

본 논문은 전력품질을 개선하고 전력설비 피해를 감소하기 위한 새로운 재폐로방식에 대해서 설명하였다. 제안된 방식은 사고전류의 크기에 따라 적절한 재폐로 시도횟수와 재폐로 무전압시간을 결정한다. 재폐로에 의한 공급신뢰도의 영향을 평가하기 위해서 SAIFI지수를 사용하였으며, 설비충격을 평가하기 위해서 EFII지수를 도입하였다. 사례연구에서는 현장 운전데이터를 사용하여 평가하였으며 평가결과 제안된 방식이 변압기의 충격을 감소함을 입증하였다.

## 참 고 문 헌

[1] 김재철 외, "전력용 변압기 사고감소에 관한 연구(1)", 한국전력공사 기술연구원, KRC-88S-J04, 1989.  
 [2] L.Johnston et al., "An analysis of VEPCO's 34.5kV distribution feeder faults as related to through fault failures of substation transformers", IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol.PAS-97, No.5, pp.1876-1884, Sep/Oct. 1978.  
 [3] R.G.Coney, "Autoreclosing practices and experience in

ESKOM", CIGRE 34-202, Aug/Sep. 1992.  
 [4] Ramon de la Rosa et al., "Reclosing principle application on the low voltage side of distribution transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 4, pp.1899-1905, Oct. 1991  
 [5] C.M.Warren, "The effect of reducing momentary outages on distribution reliability indices", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.7, No.3, pp.1610-1617, July 1992  
 [6] 김재철 외, "재폐로방식이 전력용 변압기에 미치는 영향 평가", 대한전기학회 논문지, 제 48A권, 3호, pp.177-183, 1999년 3월.  
 [7] AP.Apostolov et al., "Intelligent reclosing for overdutied breaker", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.10, No.1, pp.153-158, Jan. 1995.  
 [8] WAEImore, Protective Relaying Theory and Applications, New York : ABB Power T&D Company Inc., pp.333-336, 1994.  
 [9] W.J.McNutt et al., "The combined effects of thermal aging and short-circuit stresses on transformer life", IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, Vol.PAS-95, No.4, pp.1275-1286, July/Aug. 1976.  
 [10] W.J.McNutt, "A Proposed functional life test model for power transformer", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-96, No.5, pp.1648-1656, Sept./Oct. 1977.

## ◇ 저자 소개 ◇

### 임 성 정 (林成正)

1967년 6월 4일생. 1991년 서울산업대학교 전기공학과 졸업(학사). 1993년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~2000년 숭실대학교 부설 생산기술연구소 연구원. 2000년~현재 현대중공업 기전연구소 선임연구원.

### 김 재 철 (金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업 1983년 서울대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대 전기공학과 교수.