

Evaluation of Damage from Reclosing Scheme for Power Transformer

吳正桓* · 尹尙濶* · 林成正** · 金載哲***

(Jung-Hwan Oh · Sang-Yun Yun · Seong-Jeong Rim · Jae-Chul Kim)

Abstract - This paper presents how to evaluate the transformer damage caused by reclosing scheme at the distribution substation. We describe a quantitative relationship between the reclosing scheme and the number of fault current flowing through transformer using the probability of a reclosing success/failure. The transformer damage from reclosing scheme is presented using a weight function and a damage function. A weight function is associated with the number of reclosing attempts and the reclosing deadtime to consider cumulative stress caused by reclosing scheme. A damage function is associated with a transformer impact ratio and a transformer functional life. In the case study, the transformer damage is simulated for the probability of a reclosing success. And the evaluation of transformer damage using KEPCO's operation data is performed.

Key Words : Reclosing Scheme, Power Transformer, Fault Current, Cumulative Damage

1. 서 론

전력용 변압기에 큰 고장전류가 유입되는 경우 프레스보드, 권선 절연물 등의 구조물은 열적, 기계적 스트레스를 받음으로서 열화되고, 특히 권선 절연물에 인가되는 기계적 스트레스로 인한 절연파괴는 변압기 고장의 주요한 원인이다[1]. 실제로 사고가 발생한 154[kV] 전력용 변압기 32대의 사고 분석결과에 고장전류에 의한 절연파괴가 사고원인의 많은 부분을 차지함을 나타내었다[2].

계통에 사고가 발생하면 차단기를 트립함으로써 사고선로를 차단하고 일정시간이 경과한 후에 차단기를 다시 투입하는 재폐로방식은 공급신뢰도 향상을 위하여 송배전계통에서 사용되는 보호방식이다. 일반적으로 재폐로방식은 배전계통의 전력을 공급하는 변전소의 선로 인출지점 또는 선로 리크로저 등에 의하여 선로 중간에서 수행된다. 선로중의 리크로저에 의한 재폐로는 비교적 작은 고장전류를 전력용 변압기에 유입시키기 때문에 변압기에 미치는 피해는 미소하다. 배전계통의 재폐로방식은 재투입 횟수가 1회인 송전계통과는 다르게 재투입 횟수가 1~4회인 다중투입방식을 적용하고 있다. 이로 인하여 변압기로의 연속적인 고장전류 유입은 변압기에 가해지는 스트레스를 누적시킴으로서 열화를 가속시킬 뿐만 아니라 운전수명을 단축시킬 수 있다.

IEEE 전력계통 보호계전 위원회(PSRC)는 매 5년마다 미국, 캐나다 전역의 전력회사를 대상으로 현행 보호방식에 관한 설문조사를 실시·발표하고 있으며, 이를 통하여 재폐로방식의 변화경향과 변경사유를 파악할 수 있다[3]. 조사결과 재폐로방식의 변경사유중 하나가 전력용 변압기에 유입되는 고장전류의 횟수를 제한하기 위한 것이었다. L. Johnston 등은 재폐로방식을 변경하여 전력용 변압기 고장을 감소시킨 연구결과를 발표하였다[4]. 여기서는 재폐로 동작횟수를 줄임으로서 변압기로의 고장전류 유입횟수를 감소시켰고, 재폐로 시간을 늘림으로서 재폐로 성공률을 증가시켰다. 결과적으로 재폐로방식을 변경하여 변압기로 유입되는 고장전류 횟수를 감소시킴으로서 변압기에 가해지는 충격을 감소시켰다. 이와 같이 재폐로방식은 전력용 변압기의 열화에 직접적인 영향을 미친다고 할 수 있으므로 이 관계를 설명할 수 있는 평가방법이 필요하다.

본 논문은 배전계통에서의 재폐로방식이 전력용 변압기에 미치는 영향 평가방법을 제시하였다. 계통에서 발생한 사고에 대한 재폐로 성공/실패율을 조건부확률로써 나타내었으며, 재폐로방식과 변압기로의 고장전류 유입관계를 변압기 충격비(TIR : Transformer Impact Ratio)로서 나타내었다. 재폐로방식에 의하여 변압기가 받는 영향을 각각의 재폐로 시도에 따른 가중치함수와 위험함수의 곱으로 나타낸 변압기 위험지수(TDRI : Transformer Damage from Reclosing Index)로 정식화 하였다. 가중치함수는 재폐로방식에 따른 스트레스 누적효과를 적절하게 표현할 수 있도록 재폐로 시도횟수와 무전압시간의 함수로서 구성하였고, 위험함수는 재폐로에 따른 변압기 충격비(TIR)와 변압기 운전수명을 사용하여 표현하였다. 사례연구에서 재폐로 성공률에 따른 변압기 영향

* 正 會 員 : 崇實大 電氣學科 博士課程

** 正 會 員 : 崇實大 生産技術研究所 研究員

*** 正 會 員 : 崇實大 電氣學科 教授 · 工博

接受日字 : 1998년 7월 6일

最終完了 : 1999년 1월 12일

을 검토하였으며, 한국전력공사의 운전데이터에 제시한 평가 방법을 적용하여 이의 결과를 비교 분석하였다.

2. 고장전류에 의한 변압기의 영향

2.1 고장전류와 기계적 스트레스

운전중인 전력용 변압기는 다양한 크기의 열적, 전기적, 기계적 스트레스를 받는다. 일반적으로 열적 스트레스는 주위 온도와 부하상태 등에 따라 좌우되며, 전기적 스트레스는 서지와 같은 과도전압에 의하여 발생한다. 기계적 스트레스는 사고로 인하여 고장전류가 변압기로 유입됨으로써 발생되며 변압기 고장의 주요한 원인이 되고 있다[5]. 사고가 발생할 경우 고장전류는 교류성분과 과도성분의 합으로 표현되며, 교류성분은 시간주기에 따라서 일정한 크기를 갖는 반면에 과도성분은 상대적으로 빨리 감소하는 특성을 나타낸다. 공급 능력이 무한대인 전압 $\sin(\omega t)$ 에 대한 고장전류는 식 (1)과 같다[6].

$$i_{sc} = \frac{I_n \sqrt{2}}{Z} \left[\sin(\omega t + \alpha - \phi) + \sin(\phi - \alpha) \times \exp\left(-\frac{R}{L} t\right) \right] \quad (1)$$

여기서, I_n : 변압기 정격전류의 실효값
 Z : 임피던스[p.u.]
 α : 사고순간의 전압, 전류 위상차
 ϕ : $\tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$

식 (1)로부터 고장전류는 단락임피던스의 $X/R(\omega L/R)$ 비에 따라서 다른 크기의 과도성분을 갖기 때문에 다양한 순시전류값을 갖음을 알 수 있다. 이러한 고장전류가 변압기에 유입되면 권선에는 고장전류에 의해서 축방향력(axial force)과 반경방향력(radial force)의 전자력이 발생하며, 이 전자력은 인가되는 고장전류의 2배 주파수를 갖는다[7]. 일반적인 디스크형 변압기에 있어서 반경방향력은 변압기에 큰 영향을 미치지 못하지만 축방향력은 권선을 누르는 압축력으로 변압기의 권선 절연을 손상시키는 기계적 스트레스의 원인이 되고 있다. 또한 변압기에 있어서 기계적 스트레스는 서서히 감소하기 때문에 사고발생시 인가된 최대 기계적 스트레스가 어느 정도 지속된다고 할 수 있다. 식 (2)는 순시전류와 최대 기계적 스트레스의 관계를 나타낸 것이다[5].

$$\sigma = C_1 \times i^2 \quad (2)$$

여기서, σ : 최대 축방향 스트레스(기계적 스트레스)[psi]
 i : 전류 순시값[A]

식 (2)에서 기계적 스트레스는 전류 순시값의 제곱에 비례함을 알 수 있으며 C_1 은 변압기 구조와 실험에 의해서 결정되는 상수이다.

2.2 변압기 수명

고장전류로 인한 기계적 스트레스는 권선, 철심의 변형을 발생시킴으로서 결과적으로 변압기를 고장에 이르게 한다. 대부분의 변압기 사고는 노화와 기계적 스트레스에 의한 권

선 절연물의 절연파괴로부터 발생되며, 이러한 현상은 장시간 사용에 따른 절연물의 열화와 고장전류가 원인이 되어서 발생한다. McNutt 등은 실험을 통해서 변압기 운전수명(TFL : Transformer Functional Life)과 기계적 스트레스, 단위노화의 관계를 고찰하였으며 이로부터 식 (3)과 같은 수학적 모델을 제안하였다[8].

$$TFL = C_2 \times \sigma^{-C_3} \times \exp(-C_4 \cdot y) \quad (3)$$

여기서, TFL: 변압기의 운전 수명[cycles]
 σ : 기계적 스트레스[psi]
 y : 단위노화[p.u.]

2.3 스트레스 누적효과

사고 k에 의하여 발생한 스트레스가 n(k)동안 지속되고 이 스트레스에 의하여 대상물이 $N_r(k)$ 후에 파손된다면, 이것에 가해지는 사건 k에 대한 위험 D(k)는 식 (4)와 같다[9].

$$D(k) = \left[\frac{n(k)}{N_r(k)} \right]^{a(k)} \quad (4)$$

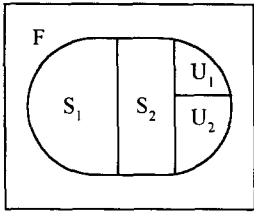
식 (4)에서 $a(k)$ 는 사고 k의 스트레스에 따라서 결정되는 양수로서 대상물에 대한 실험을 통하여 주어지며 $n(k)$, $N_r(k)$ 는 시간[cycles]을 단위로 한다. 결국 식 (4)는 사고 k에 의하여 대상물에 누적된 위험정도를 나타낸 것으로서 k에 대한 D(k)의 누적이 1이 되면 대상물이 파손됨을 알 수 있다.

3. 재폐로에 의한 변압기 영향

3.1 재폐로방식과 고장전류 유입

계통에서 사고 발생시 고장전류는 전력용 변압기를 통하여 흐르고, 이 고장전류는 선로 인출 지점의 차단기에 의한 사고 선로 트립과 동시에 변압기에 흐르지 않는다. 차단기를 개방한 후에 사고가 제거되었다면 재폐로시 변압기를 통하여 흐르는 고장전류는 없지만, 사고가 제거되지 않은 상태에서의 재폐로는 다시 고장전류를 변압기를 통하여 흐르게 함으로서 변압기는 재폐로에 의하여 1회의 충격을 다시 받는다. 여기서는 재폐로에 의하여 변압기에 가해지는 충격 즉, 재폐로 성공/실패를, 재폐로 동작횟수와 변압기로의 고장전류 유입관계를 나타내었다.

일반적으로 배전계통의 재폐로방식은 가공선로와 지중선로의 구성비를 기준으로 다른 재폐로방식을 적용한다. 우리나라의 경우 전체선로에서 지중선로가 차지하는 비율이 30[%] 이상이면 1회 재폐로방식을 적용하고, 30[%] 미만인 경우에는 2회 재폐로방식을 적용하고 있다[10]. 또한 완전 지중선로로 구성되어 있거나 재폐로 계전기가 운휴 중이면 사고가 발생하여도 재폐로는 수행되지 않는다. 변압기로부터 전력을 공급받는 계통에서 사고가 발생하였을 경우 사고와 재폐로방식의 관계를 그림 1에 나타내었다. 그림 1과 같이 재폐로가 시도된 사고는 1회 성공(S_1), 1회 실패(U_1), 2회 성공(S_2), 2회 실패(U_2)로 각각 독립적인 사고로 분류를 할 수 있으며, 1회 실패(U_1)는 1회 재폐로방식을 적용하였을 경우의 재폐로가 실패된 사고를 나타낸다.



F : 계통 사고
 S_i : i번째 재폐로가 성공된 사고
 U_i : i회 재폐로방식이 실패된 사고

그림 1 계통사고와 재폐로 성공/실패 사고의 관계
 Fig. 1 Relationship between system faults and reclosing successes/failures

재폐로 성공률은 재폐로가 적용된 사고 중에서 재폐로가 성공한 사고확률을 의미하므로 조건부 확률을 사용해서 표현할 수 있다. 1회 재폐로 성공률은 재폐로방식을 적용한 사고 중에서 첫 번째 재폐로가 성공한 사고확률, 2회 재폐로 성공률은 두 번째 재폐로가 성공한 사고확률을 의미한다. 따라서 전체 사고 중에서 재폐로가 적용된 사고가 FR이고 각각의 사고가 독립이라면 i번째 재폐로 성공률은 식 (6)과 같다.

$$FR = \sum_{i=1}^m (S_i + U_i) \tag{5}$$

$$P(S_i|FR) = \frac{P(S_i)}{P(FR)} = \frac{S_i}{FR} \tag{6}$$

$$P(U_i|FR) = \frac{P(U_i)}{P(FR)} = \frac{U_i}{FR}$$

고장전류는 재폐로가 성공할 경우 흐르지 않지만, 재폐로 실패시에는 다시 흐르기 때문에 변압기는 고장전류에 의한 재충격을 받게 된다. 재폐로 동작횟수와 성공/실패에 따른 변압기로의 고장전류 유입을 표 1에 나타내었다.

표 1 재폐로 상황에 따른 고장전류 유입
 Table 1 Fault current flowing through transformer according to reclosing conditions

재폐로 상황		고장전류 유입	고장전류 총 유입횟수
첫 번째 재폐로	성공	×	1회
	실패	○	2회
두 번째 재폐로	성공	×	2회
	실패	○	3회

표 1과 같이 변압기에 유입되는 고장전류 횟수는 재폐로 동작횟수와 성공/실패에 따라 다르며, 이 관계를 변압기 충격비(TIR : Transformer Impact Ratio)로서 식 (7)과 같이 정의한다.

$$TIR = \frac{\text{고장전류 총 유입횟수}}{\text{사고횟수}} = TIR_0 + \Delta TIR_1 + \Delta TIR_2 + \dots \tag{7}$$

여기서, TIR₀ : 재폐로를 하지않을 경우 TIR (TIR₀=1)
 ΔTIR₁ : 첫 번째 재폐로 동작에 의한 TIR 증분
 ΔTIR₂ : 두 번째 재폐로 동작에 의한 TIR 증분

재폐로 총 동작횟수가 m인 경우 식 (7)을 재폐로 동작 i에

대하여 일반화하면 식 (8)로 표현된다.

$$TIR = TIR_0 + \sum_{i=1}^m \Delta TIR_i = TIR_0 + \sum_{i=1}^m \left\{ 1 - \sum_{j=1}^i [P(S_j|FR) + P(U_{j-1}|FR)] \right\} \times P(FR) \tag{8}$$

식 (8)에서 U₀=0이다. 만약 재폐로가 적용된 모든 사고에 대하여 m회 재폐로방식만이 적용되었다면 U₀=U₁=...=U_{m-1}=0이므로 식 (8)은 식 (9)와 같이 표현된다.

$$TIR = TIR_0 + \sum_{i=1}^m \left\{ 1 - \sum_{j=1}^i P(S_j|FR) \right\} \times P(FR) \tag{9}$$

3.2 재폐로방식에 의한 변압기 영향평가

3.2.1 평가지수

재폐로방식이 적용되는 배전계통에 있어서 전력용 변압기는 연속적인 고장전류로 인한 충격을 받게된다. 이러한 충격은 재폐로 시도횟수 증가와 더불어 증가할 것이며 하나의 사고에 대하여 연속적으로 누적됨으로서 변압기 열화를 가중시킬 것이다. 식 (10)은 재폐로방식에 의하여 변압기가 받는 영향을 각각의 재폐로 시도에 따른 가중치 함수와 위험 함수로서 나타낸 것이며, 재폐로방식에 의한 변압기 위험지수(TDRI : Transformer Damage from Reclosing Index)로 표현하였다.

$$TDRI = TDRI_0 + \sum_{i=1}^m \Delta TDRI_i = W_0 D_0 + \sum_{i=1}^m (W_i \times \Delta D_i) \tag{10}$$

여기서, TDRI₀ : 재폐로를 하지 않을 경우 TDRI
 ΔTDRI_i : i번째 재폐로가 변압기에 미치는 TDRI 증분

식 (10)에서 ΔTDRI_i는 i번째 재폐로의 가중치 W_i와 i번째 재폐로의 위험증분 ΔD_i의 곱으로 나타낸다.

3.2.2 가중치 함수

고장전류 유입은 변압기에 스트레스를 가하며 사고선로가 개방된 무전압시간동안 스트레스는 점차적으로 감소하지만, 사고가 제거되지 않은 상태에서의 재폐로는 다시 변압기에 스트레스를 가하게 된다. 이때 무전압시간이 변압기에 가해진 스트레스를 회복하도록 충분히 길지 못하다면 스트레스는 누적될 것이다. 이러한 관계를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서와 같이 변압기 스트레스는 재폐로 시도횟수가 증가할수록 증가할 것이고 무전압시간이 증가하면 스트레스를 회복할 수 있는 시간이 길어지기 때문에 누적되는 스트레스는 감소할 것이다. 재폐로방식에 따른 스트레스 누적효과를 적절하게 표현할 수 있는 가중치 함수는 재폐로 시도횟수와 무전압시간의 함수로서 구성하였으며, i번째 재폐로 시도에 대한 가중치 함수를 식 (11)에 나타내었다.

$$W_i = W_i(N, T_{dead}) \tag{11}$$

여기서, N : 재폐로 시도횟수 (N=i)
 T_{dead} : 무전압 시간

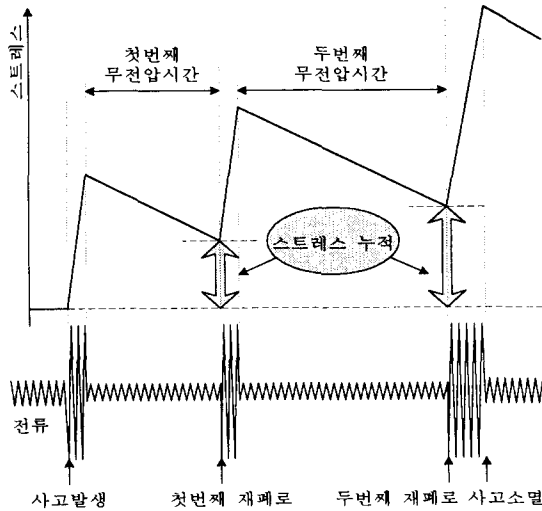


그림 2 재폐로방식에 의한 누적 스트레스 개념도
 Fig. 2 Concept of cumulative stress caused by reclosing scheme

가중치 함수는 고장전류에 의하여 변압기가 받는 스트레스에 재폐로방식의 영향을 고려한 것이며, 재폐로 시도횟수와 무전압시간의 극값에서 가중치 함수의 특성은 다음과 같다.

특성 1 : 어떤 사고에 대하여 재폐로를 적용하지 않았다면 재폐로방식에 의한 스트레스 누적효과는 없기 때문에 가중치 함수는 1이다.

$$\lim_{N \rightarrow 0} W_i(N, T_{dead}) = 1 \quad (12)$$

특성 2 : 재폐로 시도횟수가 무한대로 증가하면 변압기는 파손될 것이기 때문에 가중치 함수는 무한대가 된다.

$$\lim_{N \rightarrow \infty} W_i(N, T_{dead}) = \infty \quad (13)$$

특성 3 : 무전압시간이 아주 짧다면 재폐로방식에 의하여 스트레스 누적이 발생할 것이며 가중치 함수는 1보다 큰 값을 갖는다.

$$\lim_{T_{dead} \rightarrow 0} W_i(N, T_{dead}) = \text{constant} > 1 \quad (14)$$

특성 4 : 무전압시간이 스트레스 누적을 회복할 수 있도록 충분히 길다면 재폐로방식에 의한 스트레스 누적이 없기 때문에 가중치 함수는 1이다.

$$\lim_{T_{dead} \rightarrow \infty} W_i(N, T_{dead}) = 1 \quad (15)$$

식 (12)~(15)를 만족시키는 함수로서 식 (16)의 가중치 함수를 도입하였으며, 계수 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 는 실험을 통하여 구할 수 있다.

$$W_i(N, T_{dead}) = \beta_0 N_i^{\beta_1} \times \exp(-\beta_2 T_{dead i}) + 1 \quad (16)$$

3.2.3 위험 함수

재폐로방식에 의한 변압기 위험함수(D)를 변압기 운전수명(TFL)과 재폐로에 따른 변압기 충격비(TIR)를 사용하여 표현하였다. 변압기에 인가되는 스트레스는 고장전류가 스트레스 원인이기 때문에 그 지속시간은 보호방식과 보호기기 트립속도에 의존한다. 사고 k에 대하여 i번째 재폐로에 의한 스트레스 지속시간 $n_i(k)$ 는 i번째 재폐로의 트립시간 $t_i(k)$ 와 변압기 충격비 $TIR_i(k)$ 의 곱으로서 식 (17)과 같이 표현된다. 여기서 $t_0(k)$ 는 사고 발생 직후의 선로 트립시간이다.

$$n_i(k) = \begin{cases} t_i(k) \times TIR_i(k), & i = 0 \\ t_i(k) \times \Delta TIR_i(k), & i \geq 1 \end{cases} \quad (17)$$

사고 k에 대한 변압기의 $N_i(k)$ 는 식 (3)의 변압기 운전수명을 동일하게 적용할 수 있으므로 식 (18)과 같이 표현할 수 있다.

$$N_i(k) = TFL(k) \quad (18)$$

따라서 재폐로방식을 고려할 경우에 사고 k에 대하여 i번째 재폐로에 따른 위험 함수는 식 (17), (18)를 식 (4)에 대입함으로서 식 (19)와 같이 된다.

$$D_i(k) = \begin{cases} \left[\frac{t_i(k) \times TIR_i(k)}{TFL(k)} \right]^{a(k)}, & i = 0 \\ \left[\frac{t_i(k) \times \Delta TIR_i(k)}{TFL(k)} \right]^{a(k)}, & i \geq 1 \end{cases} \quad (19)$$

각각의 사고 k에 대하여 재폐로방식을 고려하였을 경우 변압기가 받는 전체 TDRI는 식 (20)과 같으며, 변압기 위험치수 계산과정을 그림 3에 나타내었다.

$$\sum_k TDRI(k) = TDRI(1) + TDRI(2) + \dots + TDRI(e) \quad (20)$$

여기서, e : 전체 사건수

4. 사례연구 및 고찰

4.1 재폐로 성공률에 따른 변압기 영향

가중치 함수의 무전압시간 T_{dead} 단위를 싸이클로 하고 첫 번째 무전압시간 0.5[sec], 두 번째 무전압시간 15[sec]로 하였을 경우 계수에 따른 가중치 함수를 표 2에 나타내었다.

표 2 계수 β_2 에 대한 가중치 함수의 변화 ($\beta_0 = \beta_1 = 1$)
 Table 2 Variation of Weight function according to coefficient β_2 ($\beta_0 = \beta_1 = 1$)

계수값	가중치 함수		
	W_0	W_1	W_2
1	1.00	1.00	1.00
60^{-1}	1.00	1.61	1.00
$(60 \times 60)^{-1}$	1.00	1.99	2.56
$(60 \times 60 \times 60)^{-1}$	1.00	2.00	2.99

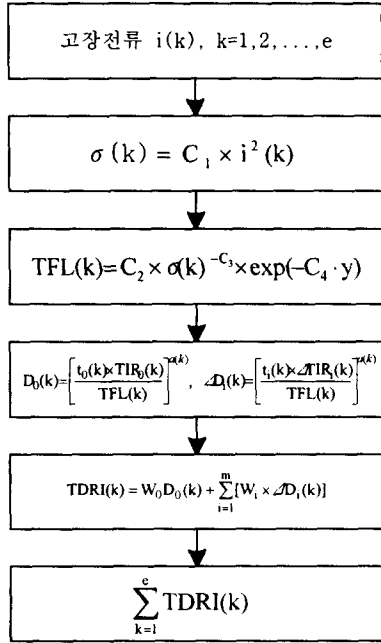


그림 3 변압기 위험지수(TDRI) 계산 과정
Fig. 3 Flow diagram of calculating TDRI

2회 재폐로방식, $a(k)=0.3546$ 을 적용하고 전체사고에서 재폐로가 시도된 사고는 70[%]로 가정하였다. 전체 재폐로 성공률 0~100[%], 1회성공:2회성공 비율 1:0~0:1 범위에서 변화시켰을 때의 변압기 위험지수를 그림 4에 나타내었다. 전체 재폐로 성공률은 2회 재폐로방식까지 적용하였을 경우의 재폐로 성공률을 의미한다. TDRI는 재폐로방식을 적용하지 않은 경우(0회 재폐로방식)를 기준으로 상대적으로 나타내었다.

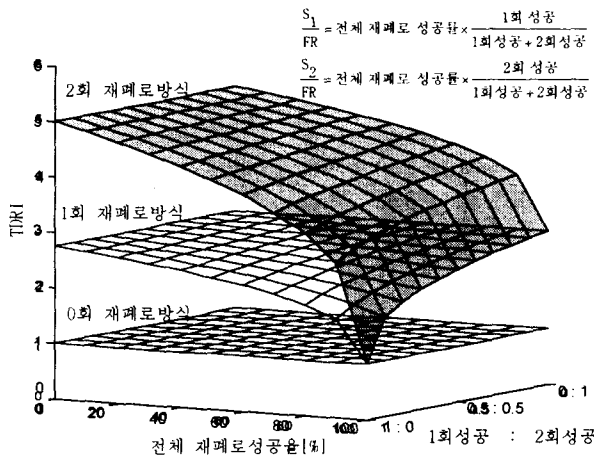


그림 4 재폐로 성공률에 따른 TDRI($W_0=1, W_1=1.99, W_2=2.56$)
Fig. 4 TDRI as a function of the probability of reclosing success ($W_0=1, W_1=1.99, W_2=2.56$)

그림 4로부터 전체 재폐로 성공률이 증가하면 변압기 위험이 감소하고 1회 성공 비율이 높을수록 재폐로방식으로 인하여 변압기가 받는 영향은 감소하며, 변압기 위험정도는 전체

재폐로 성공률에 비교적 민감하게 변화함을 알 수 있다.

4.2 모델계통의 적용

모델계통의 전력용 변압기 2차측에 설치된 고장전류 기록계에서 검출된 사고파형을 분석함으로써 변압기에 유입되는 고장전류 크기를 분류하였으며 이것을 그림 5에 나타내었다.

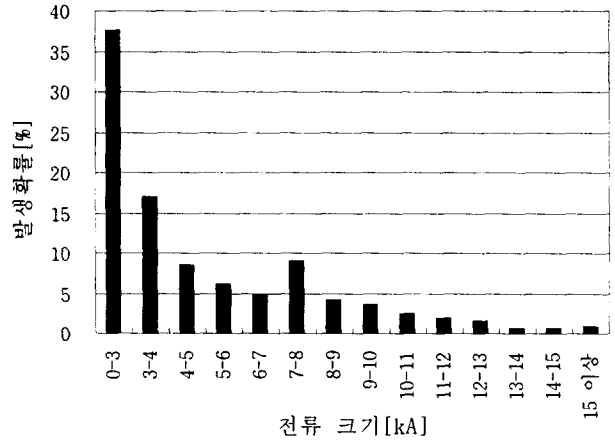


그림 5 모델계통의 고장전류 분포

Fig. 5 Distribution of instantaneous fault current at model system

그림 5에서 고장전류 크기는 검출된 사고파형의 순시값을 나타낸 것이며 고장전류 크기가 증가할수록 발생횟수가 감소함을 알 수 있다. 고장전류에서 4[kA]이하의 전류가 약 55[%]를 차지하고 고장전류 크기가 15[kA] 이상인 경우는 전체 고장의 1[%]에 해당한다.

재폐로방식이 전력용 변압기에 미치는 영향은 변압기 충격비(TIR) 즉 사고횟수에 대한 변압기를 통하여 흐르는 고장전류 총 횟수와 재폐로방식에 의한 누적효과를 계산함으로써 산출할 수 있다. 변압기 충격비를 산출하기 위하여 모델계통의 사고횟수와 재폐로 성공/실패 횟수를 수집·분류하였다. 모델계통은 3대의 전력용 변압기(MTr)를 통해서 전력을 공급하고 있으며, 각각의 변압기로부터 전력을 공급받는 선로에서 발생한 사고 및 재폐로 성공/실패 횟수를 표 3에 수록하였다[11].

표 3 모델계통의 사고 및 재폐로 성공/실패 횟수

Table 3 Number of system faults and reclosing successes/failures at model system

구분	총사고	1회성공	2회성공	1회실패	2회실패
#1 MTr (선로수:4)	32	20	1	2	6
#2 MTr (선로수:8)	164	61	7	9	16
#3 MTr (선로수:8)	98	64	11	3	11

표 3은 4년(1991년~1994년)간의 보호계전기 동작월보를 분류한 것이며 배전선로에서 발생한 총 사고의 72[%]에 대한

여 재폐로 동작이 수행되었다. 평가관련계수는 적용하고자 하는 변압기의 구조, 절연물 특성 등에 의하여 결정되는 값으로서 실험 실험이나 축소모델을 이용하여 실험함으로써 구해 질 수 있으며 여기서는 참고문헌에 제시된 값을 이용하였다.

표 4 평가 관련 계수

Table 4 Coefficients related to evaluation

구 분	계수값	참고문헌
C ₁	7.6×10^{-5}	[5]
C ₂ , C ₃ , C ₄	8.50×10^{18} , 3.57, 3.99	[8]

재폐로방식이 전력용 변압기에 미치는 영향은 TDRI를 이용하여 상대적으로 나타내었다. 위험함수는 표 3을 이용하여 변압기 충격비(TIR)를 산출 후 사고선로 트립시간을 5[cycles]로 가정하여 계산하였다. 고장전류의 크기 분포는 그림 3을 이용하였고 변압기 노화가 없는 경우에 대하여 TDRI를 계산하였으며, #1MTr에서 재폐로를 하지 않았을 경우를 기준으로 상대적으로 그림 6에 나타내었다.

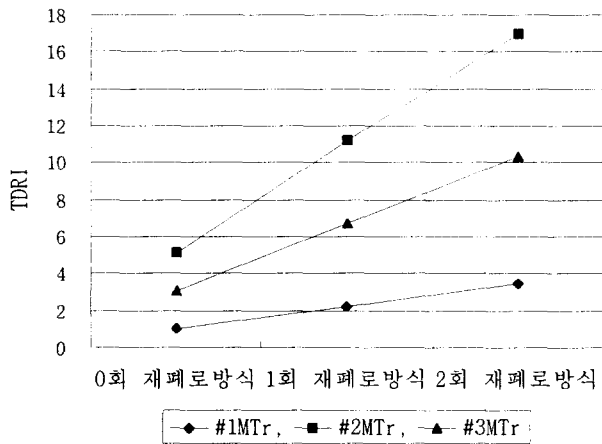


그림 6 재폐로방식에 대한 TDRI (W₀=1, W₁=1.99, W₂=2.56)

Fig. 6 Variation of TDRI for reclosing scheme (W₀=1, W₁=1.99, W₂=2.56)

그림 6으로부터 재폐로방식은 전력용 변압기에 위험을 누적시키고 이것은 재폐로 시도횟수의 증가와 더불어 증가함을 알 수 있다. 평가결과 #1 MTr의 경우 2회 재폐로방식에 의하여 재폐로를 하지 않았을 경우와 비교하여 약 3.5배 위험이 증가하였다. #2 MTr의 경우 2회 재폐로방식에 의하여 재폐로를 하지 않았을 경우와 비교하여 약 3.3배 위험이 증가하였으며, 계통내에서 발생한 사고가 비교적 많기 때문에 재폐로방식에 의하여 많은 위험을 받는다.

5. 결 론

본 논문에서는 배전계통의 재폐로방식이 전력용 변압기에 미치는 영향을 가중치함수와 위험함수로 구성된 지수를 이용하여 평가하는 방법을 제시하였다. 재폐로방식으로 인한 스트레스 누적효과를 재폐로 시도횟수와 무전압시간의 관계로

표현한 가중치 함수를 이용하여 고려하였으며, 재폐로방식으로 인하여 부과되는 고장전류 유입을 위험함수에 반영하였다. 제시한 평가기법을 모델계통에 적용한 결과 재폐로 동작 횟수의 증가는 변압기 위험을 증가시키고, 재폐로방식을 수행하지 않을 때와 비교하여 1회 재폐로방식 약 2.2배, 2회 재폐로방식 약 3.4배의 변압기 위험을 증가시킬 수 있었다. 제시된 방법은 배전계통에서 재폐로방식이 전력용 변압기에 미치는 영향을 파악하고, 적절한 재폐로방식을 선정하는데 효과적으로 활용될 수 있으리라 사료된다.

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원으로 이루어졌으므로 이에 감사드립니다.(과제번호 : 981-0901-002-2)

참 고 문 헌

- [1] W. J. McNutt, C. J. McMillen, P. O. Nelson, J. F. Dind, "Transformers Short-Circuit Strength and Standards - A State-Of-The-Art Paper," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-94, No. 2, pp. 432-443, March/April 1975.
- [2] 김재철 외, 전력용 변압기 사고감소에 관한 연구 (1차년도 : 연구보고서), 한국전력공사 전력연구원, KRC-88S-J04, 1989년 9월.
- [3] IEEE Power System Relaying Committee, "Distribution Line Protection Practices - Industry Survey Results," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 10, No. 12, pp. 176-186, January 1995.
- [4] L. Johnston, N. B. Tweed, D. J. Ward, J. J. Burke, "An Analysis VEPCO's 34.5kV Distribution Feeder Faults as Related to through Failure of Substation Transformers," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-97, No. 5, pp. 1876-1884, Sept./Oct. 1978.
- [5] W. J. McNutt, "A Proposed Functional Life Test Model for Power Transformers," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-96, No. 5, pp. 1648-1656, Sept./Oct. 1977.
- [6] K. Karsai, D. Kerényi, L. Kiss, *Large Power Transformers*, Elsevier, 1987, pp. 120-145.
- [7] R. R. P. Sinha, "Evaluation of Short-Circuit Strength of Distribution Transformers," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 7, pp. 2249-2259, July 1982.
- [8] W. J. McNutt, M. R. Patel, "The Combined Effect of Thermal Aging and Short-Circuit Stresses on Transformer Life," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-95, No. 4, pp. 1275-1286, July/Aug. 1976.
- [9] F. Ellyin, *Fatigue Damage Crack Growth and Life Prediction*, Chapman & Hall, 1997, pp. 97-115.

- [10] 송병권, *배전보호 기술서*, 한국전력공사 배전처, KRC-88S-J04, 1995년 12월.
- [11] 모델 변전소 보호계전기 동작월보(1991.1~1994.12), 한국전력공사.

저 자 소 개



오 정 환(吳正桓)

1971년 1월 17일생, 1994년 서울산업대 전기공학과 졸업, 1996년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



윤 상 윤(尹尙潤)

1970년 8월 28일생, 1996년 숭실대 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



임 성 정(林成正)

1967년 6월 4일생, 1991년 서울산업대 전기공학과 졸업, 1993년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 현재 숭실대 부설 생산기술연구소 연구원



김 재 철(金載哲)

1955년 7월 22일생, 1979년 숭실대 전기공학과 졸업, 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1987년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 1988년~현재 숭실대 공대 전기공학과 교수