

푸리에 변환을 이용한 다중 재폐로방식에서의 사고전류 특징 추출

오정환*, 윤상윤*, 이난숙*, 김재철*, 배주천**, 김낙경***
 송실대학교*, 한국전력공사**, 대동기술단***

Feature Extraction of Fault Current using Fourier Transform on the Multi-Shot Rec

J. H. Oh*, S. Y. Yun*, N. S. Lee*, J. C. Kim*, J. C. Bae**, N. K. Kim***
 Soongsil Univ.*, KEPCO**, Dae Dong Tech.***

Abstract - This paper presents the feature extraction of fault current related to the multi-shot reclosing scheme in the power distribution system. Fourier transform is used to extract the feature of the fault current waveform in the case of the temporary fault and the permanent fault. After the waveform is analyzed using Fourier transform, the magnitude spectrum and the relative variation of THD are calculated. These results are that the relative variation of THD is great in the temporary fault and is little in the permanent fault.

1. 서 론

배전계통의 다중 재폐로방식(multi-shot reclosing scheme)은 일상생활에 미치는 영향이 가장 크다고 할 수 있는 보호계전 방식이다. 다중 재폐로방식은 사고가 발생하였을 경우 정전시간과 정전시간을 축소시킴으로써 전력공급 신뢰도를 향상시킨다[1]. 반면에 영구사고에 대한 재폐로는 연속적인 사고전류 유입으로 인한 전력설비 열화[2] 및 순간전압강하로 인한 전력품질 저하[3]를 발생시킨다는 단점을 가지고 있다.

재폐로방식과 관련하여 송전계통에서 푸리에 변환[4,5]과 웨이블릿 변환을 이용한 사고전압의 특징 추출이 연구되어졌다. 배전계통에서 재폐로방식과 관련된 특징 추출은 대부분 순간전압강하에 의한 전력품질 문제를 다루고 있으며[3], 재폐로방식이 성공/실패한 사고의 특징 추출에 관하여는 연구되지 않았다.

본 논문은 배전계통의 다중 재폐로방식과 관련된 사고전류의 특징을 푸리에 변환하여 추출하였다. 일반적으로 3상 2회 재폐로방식을 적용하는 국내 배전계통에서 첫 번째 재폐로가 실패한 경우, 두 번째 재폐로를 수행하기 전에 사고 순간과 첫 번째 재폐로 순간의 사고전류를 검출할 수 있다. 위의 2개의 사고전류 파형을 이용하여, 두 번째 재폐로가 성공한 순간사고(temporary fault)와 실패한 영구사고(permanent fault)에 대한 사고전류 특징을 분석하였다. 보호계전기 동작정보로부터 재폐로 성공/실패 기록을 입수하였고, 이를 바탕으로 사고기록계(fault recorder)를 이용하여 검출한 사고전류 파형을 순간사고와 영구사고로 분류하였다. 분류된 전류 파형을 주파수 분석한 후에 상대적인 전조조파왜곡(total harmonic distortion : THD) 변화를 산출함으로써 특징을 추출하였다.

2. 배전계통의 다중 재폐로방식

단일 재폐로방식을 채택하는 송전계통과는 다르게 배전계통에서는 다중 재폐로방식을 일반적으로 채택하고 있다. 단일 재폐로방식은 사고가 발생하였을 경우 차단기에 의한 사고선로 트립 후 1회 재폐로를 시도하는 것

이며, 다중 재폐로방식은 사고선로 트립 후 2회 이상의 재폐로를 시도하는 것으로서 지속적인 전력공급이 목적이다.

국내 배전계통의 가공선로에서는 3상, 2회 중속도 재폐로방식을 적용하고 있으며, 가공선로와 지중선로가 혼재된 가공+지중 복합선로에 대한 재폐로방식은 전체 선로에서 지중이 점유하는 비율에 따라 재폐로방식을 설정하고 있다[6]. 그림 1은 2회 재폐로방식을 적용하는 배전계통에서 재폐로방식이 실패한 경우의 동작순서를 전류의 변화와 비교하여 나타낸 것이다.

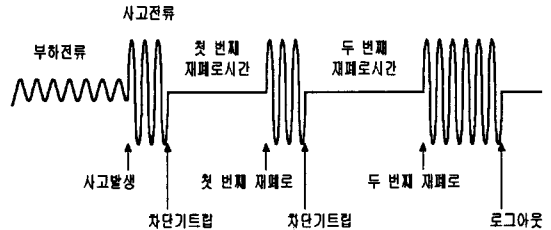


그림 1. 영구사고에 대한 재폐로 동작순서와 전류 변화

그림 1에서 보는 바와 같이 사고가 발생하면 차단기를 트립하고, 첫 번째 재폐로시간 경과 후 차단기를 재투입함으로써 첫 번째 재폐로를 수행한다. 첫 번째 재폐로 후에 사고가 제거되지 않았다면 다시 차단기를 트립하고 지정된 재폐로시간 경과 후, 두 번째 재폐로를 한다. 영구사고일 경우에는 차단기가 로그아웃 됨으로서 사고선로는 계통에서 분리된다. 따라서, 2회 재폐로방식을 적용하는 배전계통에서는 두 번째 재폐로를 시도하기 전에 사고순간과 첫 번째 재폐로 순간에 각각 사고전류를 검출할 수 있기 때문에 2회의 사고전류를 검출할 수 있다.

3. 사고전류 파형 수집 및 분류

3.1 사고전류 파형 수집

특징 추출을 위하여 기초자료로 사용된 사고전류 파형은 사고기록계를 이용하여 검출·수집하였다. 사고기록계는 미국 Macrodyne사의 ERDAC 1601 장치로 모델변전소에 1991년 1월에 설치하였다. 사고기록계의 주요한 규격은 표 1과 같다

표 1. 사고기록계 규격

제품명	샘플링 시간[μs]	분해능[bit]
EDRAC 1601	25~4,000	8

사고기록계는 모델 변전소(154/23(kV))의 #2, #3 전력용 변압기의 2차에 설치하였다. #2 전력용 변압기는 8개의 배전선로를 통하여 수용가에 전력을 공급하며, #3 변압기도 8개의 배전선로와 연결되어 있다. 사고기록계는 91년 1월부터 94년 12월까지 운용되었다.

3.2 사고전류 파형의 분류

연구사고에 대한 사고전류 특징과 순간사고에 대한 사고전류 특징을 추출하기 위하여, 수집된 파형을 연구사고에 대한 사고 파형과 순간사고에 대한 사고 파형으로 분류하였다. 모델 변전소의 보호계전기 동작원보로부터 재폐로 성공/실패, 사고 시간을 수집하여 이것과 일치하는 사고전류 파형을 분류하였다. 그 결과, 10개의 순간 사고 파형과 9개의 연구사고 파형을 분류하였다.

4. 사고전류의 특징 추출

4.1 이산 푸리에 변환에 의한 특징 추출

사고전류 파형을 이산 푸리에 변환하여 특징을 추출하는 과정을 그림 2에 나타내었다.

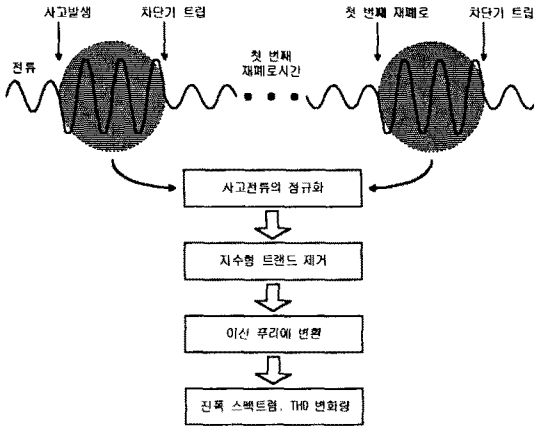


그림 2. 이산 푸리에 변환에 의한 특징 추출 과정

그림 2에서 보는 같이 사고 순간과 재폐로 순간에 검출된 2개의 사고전류 파형을 정규화하고 지수형 트렌드를 제거한 후에 사고전류 $i_f(n)$ 에 대하여 식 (1)과 같이 이산 푸리에 변환을 하였다.

$$I(k, \gamma) = D[i_f(n + \gamma\delta)] = \sum_{n=0}^{N-1} i_f(n + \gamma\delta) e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (1)$$

여기서, k : 고조파 성분 (0, 1, ..., N-1)
 γ : 푸리에 변환하는 구간 순서 (0, 1, ..., m-1)
 δ : 0.25[cycle] \approx 4.17[ms]

식 (1)의 $I(k, \gamma)$ 은 주파수 성분 k 와 푸리에 변환하는 구간 순서 γ 의 함수이다. 전류 파형의 1[cycle]를 푸리에 변환하고, $\delta = 0.25$ [cycle] 만큼 이동한 후에 다시 푸리에 변환을 반복한다. 이로부터 각 구간의 진폭 스펙트럼 $|I(k, \gamma)|$ 를 계산하였다. 계산된 각 구간의 진폭 스펙트럼의 평균값을 사고전류의 진폭 스펙트럼으로 사용하였다. 즉, m 개의 구간으로 나누어진 사고전류의 진폭 스펙트럼은 각 구간의 평균값을 취하기 때문에 식 (2)가 된다.

$$|I(k)| = \frac{1}{m} \sum_{\gamma=0}^{m-1} |I(k, \gamma)| \quad k=0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

THD는 파형의 비정현적인 특성을 정량화한 것이며, 기본 주파수 성분의 실효값에 대한 기본파가 아닌 다른 모든 주파수의 실효값의 비로 주어진다. 일반적으로 THD는 직류 성분이 영인 경우에 주로 쓰이며, 이 경우 전류에 대한 THD는 식 (3)과 같다.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{N-1} I_k^2}}{I_1} \quad (3)$$

여기서, I_1 : 기본파 전류의 실효값
 I_k : k 고조파 전류의 실효값

사고 순간에 흐르는 전류의 THD와 첫 번째 재폐로 순간에 흐르는 전류의 THD의 변화 정도를 상대적으로 비교하였다. 이것을 식 (4)와 같이 THD 상대 변화로 정의하였다.

$$THD_{\text{상대 변화}} = \left| \frac{THD(\text{첫 번째 재폐로 순간}) - THD(\text{사고 순간})}{THD(\text{사고 순간})} \right| \quad (4)$$

4.2 순간 사고의 특징

순간사고로 분류된 전류 파형을 이산 푸리에 변환하여 진폭 스펙트럼을 계산한 후에 THD 상대 변화를 산출하였다. 일례로서 1993년에 발생한 순간사고의 전류 파형을 그림 3에 나타내었고, 진폭 스펙트럼을 그림 4에 나타내었다.

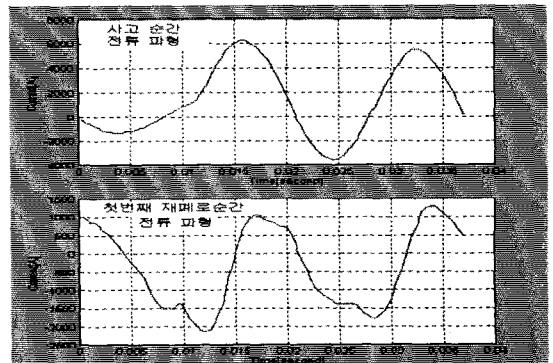


그림 3. 사고전류 파형 (순간사고)

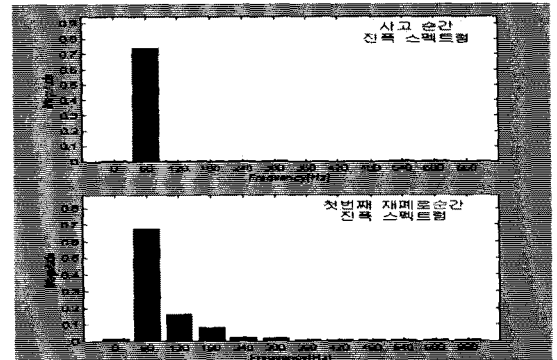


그림 4. 사고전류의 진폭 스펙트럼 (순간사고)

그림 3에서 전류 크기는 정규화하지 않은 실제로 측정된 크기이며, 지수형 트렌드가 사고전류에 포함되어 있음을 관측할 수 있다. 사고 순간의 전류 파형은 지수형 트렌드 성분을 제거한다면 비교적 고조파가 포함되지 않은 정현파임을 알 수 있다. 반면에, 첫 번째 재폐로 순간의 전류 파형은 왜곡되어 있기 때문에 고조파가 포함되어 있음을 알 수 있다. 그림 4는 정규화된 사고전류 파형의 진폭 스펙트럼이다. 사고 순간의 진폭 스펙트럼은 기본파 성분이 대부분을 차지하고 고조파 성분이 매우 적음을 알 수 있다. 그러나 첫 번째 재폐로 순간의 진폭 스펙트럼은 기본파 성분 이외에 제 2고조파, 제 3고조파 성분이 사고순간과 비교하여 많이 포함되어 있음을 알 수 있다. 순간사고에 대한 THD와 THD 상대 변

화를 종합하여 표 2에 수록하였다.

표 2. 사고 전류의 THD와 THD 상대 변화 (순간사고, TF = temporary fault)

성공사례	THD	사고 순간	첫 번째 재폐로 순간	THD 상대 변화
1TF	2.9	96.3	31.87	
2TF	3.0	110.4	35.48	
3TF	10.4	94.2	8.00	
4TF	3.0	319.7	104.53	
5TF	2.0	27.9	12.63	
6TF	2.5	136.6	53.45	
7TF	1.6	124.5	74.39	
8TF	13.1	19.6	0.50	
9TF	4.2	154.2	35.56	
10TF	1.8	128.3	67.34	

표 2로부터 순간사고에 있어서 THD 상대 변화는 일반적으로 크다는 것을 알 수 있다. 예외적으로 사례 8TF의 경우 THD 변화가 매우 적었으나, 90(%)의 사고에 대하여 THD 변화가 8이상이었다. 따라서 순간사고에 대한 사고 전류의 특징은 THD 상대 변화가 크다고 할 수 있다.

4.3 영구 사고의 특징

영구사고로 분류된 전류 파형에 대하여 이산 푸리에 변환을 하고 THD 상대 변화를 계산하였다. 1992년에 발생한 영구사고에 대한 전류 파형을 그림 5, 진폭 스펙트럼을 그림 6에 나타내었다.

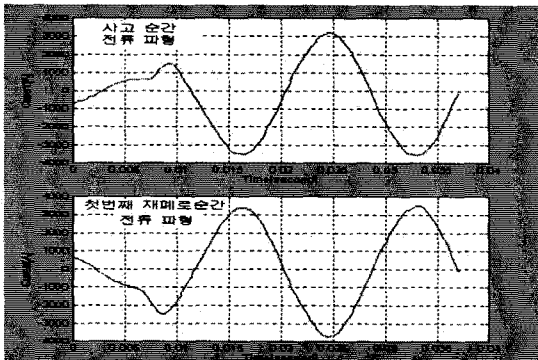


그림 5. 사고전류 파형 (영구사고)

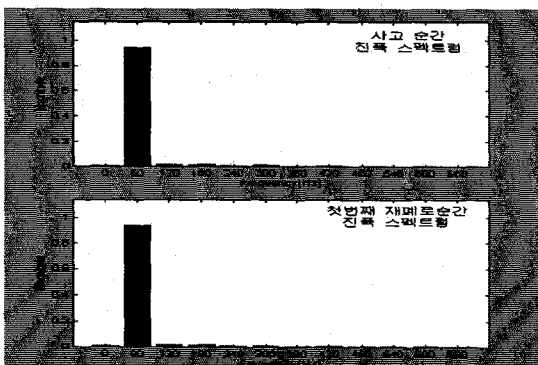


그림 6. 사고전류의 진폭 스펙트럼 (영구사고)

그림 5로부터 사고 순간과 첫 번째 재폐로 순간의 전류 파형은 비교적 고조파가 포함되지 않은 정현파임을

알 수 있다. 그림 6으로부터 사고 순간과 첫 번째 재폐로 순간의 진폭 스펙트럼은 기본파 성분이 대부분을 차지하고 고조파 성분이 매우 적음을 관측할 수 있다. 영구사고에 대한 THD와 THD 상대 변화를 표 3에 수록하였다.

표 3. 사고 전류의 THD와 THD 상대 변화 (영구사고, PF = permanent fault)

실패사례	THD	사고 순간	첫 번째 재폐로 순간	THD 상대 변화
1PF	17.4	20.5	0.17	
2PF	81.2	53.7	0.33	
3PF	1.8	3.2	0.77	
4PF	31.6	33.0	0.04	
5PF	158.1	141.3	0.11	
6PF	2.4	2.2	0.06	
7PF	78.5	90.3	0.15	
8PF	2.8	3.2	0.16	
9PF	5.1	14.3	1.78	

표 3에서 보는 바와 같이 영구사고의 경우, THD 상대 변화는 2이하로서 적다는 것을 알 수 있다. 따라서 영구사고에 대한 사고전류의 특징은 THD 상대 변화가 적다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 다중 재폐로방식과 관련된 사고전류의 특징을 추출하였다. 푸리에 변환을 이용하여 두 번째 재폐로가 성공한 순간사고에 대한 전류 특징과 두 번째 재폐로가 실패한 영구사고에 대한 전류의 특징을 추출하였다. 분류된 사고전류 파형을 분석한 결과, 순간사고는 상대적인 고조파 변화가 일반적으로 크고 영구사고는 고조파 변화가 적다는 특징을 추출하였다. 본 논문의 결과는 재폐로방식과 관련된 사고(순간사고/영구사고) 형태를 판별하는 데 기초자료로 활용될 수 있다.

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

[참 고 문 헌]

- (1) 김재철 외, 송배전선로 재폐로방식의 최적화 연구, 한국전력공사, 1998년 3월.
- (2) 김재철, 오정환, 윤상윤, 임성정, "재폐로방식이 전력용 변압기에 미치는 영향 평가", 대한전기학회 논문지, 제 48A권, 제 3호, pp. 177-183, 1999년 3월.
- (3) R. C. Dugan, Mark F. McGranaghan, and H. Wayne Beaty, Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill, chap. 5, 1996.
- (4) Y. H. Song, A. T. Johns, and R. K. Aggarwal, "Neural Network Based Adaptive Autoreclosure Technique for Long-Distance Compensated Transmission Systems," Electric Machines & Power Systems, Vol. 25, No. 3, pp. 287-294, 1997.
- (5) D. S. Fitton, R. W. Dunn, R. K. Aggarwal, A. T. Johns, and A. Bennett, "Design and Implementation of an Adaptive Single Pole Autoreclosure Technique for Transmission Lines using Artificial Neural Networks," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, pp. 748-756, April 1997.
- (6) 한국전력공사 배전처, 배전계획기준(안), 1996년 6월.