

# 배전계통에서 발생하는 돌입전류와 고장전류의 특성 비교연구

(The Study of characteristic comparison with inrush and fault current occurred in distribution system)

오용택\* · 김진성\*

(Yong-Taek Oh · Jin-Sung Kim)

## Abstract

This paper gives a type and high-frequency waves analysis of in-rush current cab be flowed into distribution automatic machine to be installed in distribution line in order to use minimizing operation error of failure indicator to have been issue recent with obtaining high-frequency component that can be different from fault current. The in-rush and fault current data studied in this paper is to be surveyed actually in USA distribution system, substation line of Bryan Power Company near Texas A. M. University, to be occurred high impedance fault.

## 1. 서론

최근의 전기에 대해 수요는 점차 증가되고 있고, 수용량의 증가와 더불어 고품질 및 고 신뢰도의 전력공급이 요청되고 있다. 이 같은 고품질의 전력공급을 위하여 배전선로상의 고장 발생 시 고장의 신속한 인지, 정전시간 단축 및 정전구역 축소를 통한 공급 신뢰도 향상을 추구하고, 평상시에는 배전선로의 각종 운전정보 취득을 통하여 배전계통의 운전상태를 감시할 수 있는 배전선로 운전자동화 시스템의 필요성이 대두되어 왔다.

그러나, 배전자동화 시스템의 신뢰도 향상에 있어 돌입전류에 의한 오동작으로 고장구간을 정확하게 판정하지 못함으로써 배전자동화의 주 기능인 고장구간 신속차단의 정확성과 신뢰도에 치명적인 악영향을 줄 수 있다. 따라서 이러한 돌입전류의 유형을 분석하고 파형 특성에 관한 연구를 수행할 필요가 있게 되었다. [1,2]

돌입전류에 대한 연구는 1940년대에 처음으로 발표되었고, 주로 발생원인에 대한 제시가 있었으며 [3,4], 1950년대부터 1960년대까지 구체적으로 연구되어 변전소의 주변압기 보호형 차동계전기의 오동작 방지를 위한 여러 가지 방법이 제시되었다. 그 후 1960년 말에 돌입전류에 포함된 고조파 특성을 이용하여 차동 계전기 오동작에 대한 문제점 해결을 시도하였으며 신뢰도 향상을 위해 계속적으로 연구가 진행되고 있다. [5,6]

그러나 배전계통에서 발생하는 돌입전류의 상태와 대책에 관한 연구는 아직도 매우 미진한 상태이다. 배전계통의 돌입전류 발생요인이 부하종류에 따라 주상 변압기, 전력용 콘덴서, 리액터, 전동기, 에어컨, 냉장고 등 다양하며, 이들이 복합적으로

작용할 때 변전소 주변압기의 돌입전류와 같이 단순하지 않으므로 배전계통의 돌입전류 특성에 대해서는 많은 연구가 필요하다. [7]

본 연구에서는 배전선로에 설치되어 있는 배전자동화 기기에 유입될 수 있는 돌입전류의 유형을 분석하여 돌입전류 파형을 고조파 분석함으로써 고장전류와 차별화 할 수 있는 고조파 성분을 추출하여 고장 표시기 오동작을 최소화하는데 활용하고자 한다.

## 2. 배전선로에서 돌입전류

배전계통의 장거리 분기선, 간선, 고장이 잦은 선로에 리클로저를 설치하여 고장이 발생하면 해당 분기선 또는 간선만 차단하게 하고 나머지 건전구간에는 전력공급이 될 수 있도록 보호장치를 쓰고 있다. 그러나 배전설비의 신, 증설 또는 보수공사 후에 배전선을 가압하면 돌입전류에 의한 오동작이 발생하여 전력공급을 지연시키고 정전시간을 연장시키게 된다. 이같이 변압기를 가압할 때 경우에 따라서는 전부하전류의 수 배 또는 십 수배의 크기를 가진 돌입전류가 발생하여 보호장치를 오동작 시키게 된다. 이때의 주 현상이 돌입전류에 의한 원인임이 알려지고 있다. [8,9]

### 2.1. 배전선 돌입전류의 발생원인

그림 2.1과 같이 단상 변압기에 전압  $e$ 를 인가하고 있을 때의 정상상태 자속은 인가전압에 대하여 90도 늦은 파형이 된다.

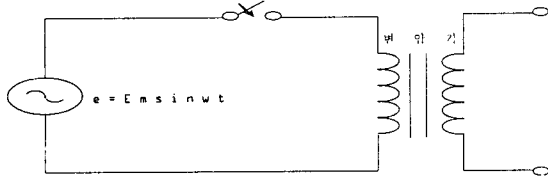


그림 21. 변압기 공급전압

이 변압기를 전압이 영인 순간에 가압한다고 하면 그 순간의 자속 변화율  $d\phi/dt$ 는 영, 즉 정현파 곡선의 최대 또는 최저가 된다. 변압기 돌입전류는 변압기가 투입되는 시점의 전압위상에 크게 좌우되며 변압기의 철심이 자화되지 않은 상태에서 일차권선에서의 전압은 식(2.1)과 같다.

$$v = \sqrt{2}V \sin \omega t \quad (2.1)$$

철심에서의 손실과 일차권선에서의 저항을 무시할 경우 전압  $v$ 는 다음과 같다.

$$v = N \, d\phi/dt \quad (2.2)$$

따라서, 자속 쇄교수는 아래 식과 같이 구할 수 있다.

$$\phi = 1/N \int v dt = \sqrt{2}V/N \int \sin \omega t dt \quad (2.3)$$

이 때 변압기 투입 시점에 따라 즉, 투입할 시점에서의 계통 전압의 위상에 따라 돌입전류의 크기는 다르게 된다. 즉, 변압기의 전압이 최대일 때 투입되는 경우 자속 쇄교는 다음과 같다.

$$\phi = \sqrt{2}V/\omega N \sin(\omega t - 90) = \phi_{\max} \sin(\omega t - 90) \quad (2.4)$$

따라서 자속 쇄교수는 최대 값으로  $\phi_{\max}$ 를 가지는 정현파로 표현되어 돌입전류는 발생하지 않으며 만일에 변압기의 전압이 영일 때 투입되는 경우 쇄교 자속은 다음과 같이 된다

$$\phi = \sqrt{2}V/\omega N(1 - \cos \omega t) = \phi_{\max} - \phi_{\max} \cos \omega t \quad (2.5)$$

위 식에서 자속쇄교수는 시간에 따라 최대 값으로  $2\phi_{\max}$ 를 가지고 최소 값으로는 0을 가지며 철심의 자화로 인하여 돌입전류는 이보다 더 큰 값을 가지게 된다.

따라서 인가전압의 위상이 0에서 투입한 경우, 전원이나 계통 임피던스가 적은 경우, 철심에 잔류자속이 있을 경우 등에는 큰 돌입전류가 흐르게 되고 또한 냉간압연 철심이나 저압 측에서 여자하는 경우에도 큰 돌입전류가 흐르게 된다.

이러한, 변압기 회로 투입 시 흐르는 큰 돌입전류는 계전기에 고장전류로 인지되어 계전기를 오동작 시키는 한편 COS나 PF같은 퓨즈 투입 시에 퓨즈를 용단(溶斷)시키게 된다.

## 2.2. 돌입전류의 일반 특성

돌입전류 파형의 특성은 최대치, 감쇠시간 그리고 유형에 따른 고조파 성분 3가지로 구분할 수 있다.

### 2.2.1. 돌입전류의 최대치

돌입전류의 최대치를 지배하는 요인은 여러 가지 있다. 즉, 변압기 결선 및 가압위치, 가압 위상각, 단상 혹은 3상의 변압기 구성, 재질, 용량, 선로임피던스 등이 있다. 이들 각각의 최대치를 살펴보면 단상변압기 3대로 구성된 3상 변압기와 3각 철심으로 구성된 3상 변압기간에 최대치에서 다소 차이가 난다. 표 2.1에서 보여지는 것처럼 일반적으로 3각 철심 변압기 쪽이 단상 변압기 3대인 경우보다도 돌입전류의 최대치가 적다. [9]

표 2.1. 단상 3뱅크와 3상 변압기의 돌입전류

변압기 결선		(돌입전류의 최대치/정격전류)배수	
투입측	비투입측	단상 3뱅크 변압기	3상 3각 철심 변압기
Y(중성점 접지)	$\Delta$	26	13
Y	$\Delta$	20	11
$\Delta$	$\Delta$	20	15.5

또한 철심이 열간 압연 규소강판의 경우와 방향성 규소강판의 경우와는 강판의 자기특성이 다르기 때문에 돌입전류의 최대치는 서로 다르지만 일반적으로 방향성 규소강판쪽이 상시 자속밀도를 높게 취하므로 돌입전류의 최대치도 크다.

동심배치 권선에서는 외측권선(고압권선)에 전압을 인가한 쪽이 내측권선(저압권선)에 인가한 경우보다 돌입전류는 적다. 이것은 외측권선쪽이 내측권선보다 공심임피던스가 크기 때문이다. 표 2.2에서 그 일례를 표시하였다. [9]

표 2.2. 철심의 제질과 인가전압에 대한 돌입전류

변압기 용량 [KVA]	(돌입전류의 최대치/정격전류)배수			
	방향성 규소강판철심		열간 압연 규소강판철심	
	고압측	저압측	고압측	저압측
500	11	16	6.0	9.4
1,000	8.4	14	4.8	7.0
5,000	6.0	10	3.9	5.7
10,000	5.0	10	3.2	3.2
50,000	4.5	9	2.5	2.5

### 2.2.2 돌입전류의 지속시간

변압기 부부하시의 기본식은,

$$e = Ri + L \frac{di}{dt} = \sqrt{2}E \sin \omega t \quad (2.6)$$

로 쓸 수 있다. 여기서  $i(t)$ 를 풀면,

$$i(t) = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{R^2 + X^2}} \left\{ \sin(\omega t - \tan^{-1} \frac{X}{R}) + e^{\frac{-R}{X}(\omega t + \theta)} \cdot \sin(\theta + \tan^{-1} \frac{X}{R}) \right\} \quad (2.7)$$

이 된다. (2.7)식에서 볼 수 있듯이 돌입전류는 제 1파에서 최대가 되고 그 후는 회로의 시정수  $L/R$ 에 따라서 감쇠한다.  $R$ 로서는 전원 및 권선의 저항과 와류손, 히스테리시스손에 의한 등가저항을 포함한 전저항을 사용하고  $L$ 로서는 전원의 인덕턴스와 가압권선의 순시여자 인덕턴스를 합한 것을 사용한다. 따라서  $L/R$ 치는 일정하지 않고 시간의 경과와 함께 변화한다.

돌입전류의 감쇠시간은 표 2.3과 같이 최대치의 50%까지 감쇠하는데 8-10사이클에서 수분 대까지 있으며 용량이 클수록 감쇠시간이 길게 나타난다.

표 2.3. 돌입전류의 감쇠시간

변압기 [KVA]	돌입전류가 50% 감쇠하는 시간(C/S)
500-1,000	최대 8-10(변압기 설계에 따라 다름)
1,667-10,000	최대 10-60(변압기 설계에 따라 다름)
10,000 이상	최대 60-3600(변압기 설계에 따라 다름)

### 2.2.3 돌입전류의 유형과 고조파 성분

배전계통에서 차단기나 개폐기의 투입 시 발생하는 돌입전류의 유형은 아래와 같은 2가지 형태로 구분된다. 즉, 차단기 또는 리클로저 재폐로 동작 시 발생하는 돌입전류(In-rush current)와 영구고장이나 현장작업에 의해 장시간 정전 후 차단기나 개폐기 투입 시 발생하는 돌입전류(Cold load pick-up current)로 구분하고 있으며 2가지 유형의 돌입전류를 비교하면 표 2.4와 같다.

표 2.4. 돌입전류 유형 비교

구분	재폐로 동작 시 돌입전류 (In-rush)	장시간 정전 후 돌입전류 (Cold load pick-up)
주원인	변압기 돌입전류	변압기 돌입전류 모터 기동전류 Cold 부하 동시 투입
지속시간	짧음(1-2초 이내)	수초 이상
돌입전류 성분	고조파 성분만 커짐	고조파 성분+ 60Hz 성분 커짐

위와 같이 돌입전류는 고조파 성분과 기본파 성분이 합성되어 정상분에 비해 크기가 커진 왜곡된 파형으로 나타난다. 이들 돌입전류를 고조파 성분으로 분해하면 돌입전류를 고장 전류와 분류할 수 있는 주요 변수로

이용할 수 있을 것이다. 그러므로 본 연구에서는 이 같은 돌입전류의 특정 고조파 성분을 규명하고자 한다.

## 3. 사례 연구

배전계통에서 오동작을 일으키는 주요 원인으로 제시되고 있는 것은 차단기나 개폐기의 투입 시 발생하는 돌입전류 현상이다. 특히, 리클로저의 재폐로 동작 시 발생하는 돌입전류는 변압기의 여자전류가 크게 영향을 미칠 수 있으므로 본 장에서는 실제 배전계통의 취득 데이터를 분석함으로써 고장전류와 구분할 수 있는 방안을 제시하였다.

### 3.1. 배전계통의 재폐로 투입에 의한 돌입전류

그림 3.1은 텍사스 대학 근처에 있는 Bryan 전력회사의 변전소에서 고 임피던스 고장에 따른 변전소 인출측 고장전류 파형을 구하게 된 개략적인 모델 계통도이다.

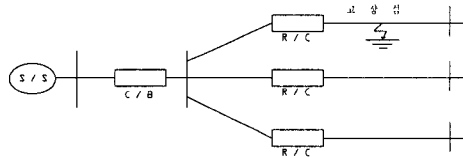


그림 3.1. 모델 계통 구성도

그림 3.2는 해당 선로의 특정 고장점 부위에 고임피던스 고장이 발생하여 차단 후 10 cycle 후 1회 순시 재폐로 시의 돌입전류 파형 및 14초 후 2회 한시 재폐로 시의 인출측 돌입전류 파형을 보여준다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 고임피던스 고장 시에 재폐로 투입 시의 돌입전류의 대다수는 배전계통의 돌입전류 유형을 보여주고 있으며 이에 대한 파형 분석을 수행하고자 한다.

그림 3.2의 파형에서 고장전류, 순시 재폐로 시의 돌입전류와 한시 재폐로 시의 돌입전류는 표 3.1처럼 Sample Number를 기준으로 분리하였다.

표 3.1. 돌입전류 유형 구간 분리

구분	Sample Number
고장전류	10560 - 10830(A, B, C상 모두 같음)
순시 재폐로 돌입전류	11670 - 11940(A, B, C상 모두 같음)
한시 재폐로 돌입전류	28500 - 28780(A, B, C상 모두 같음)

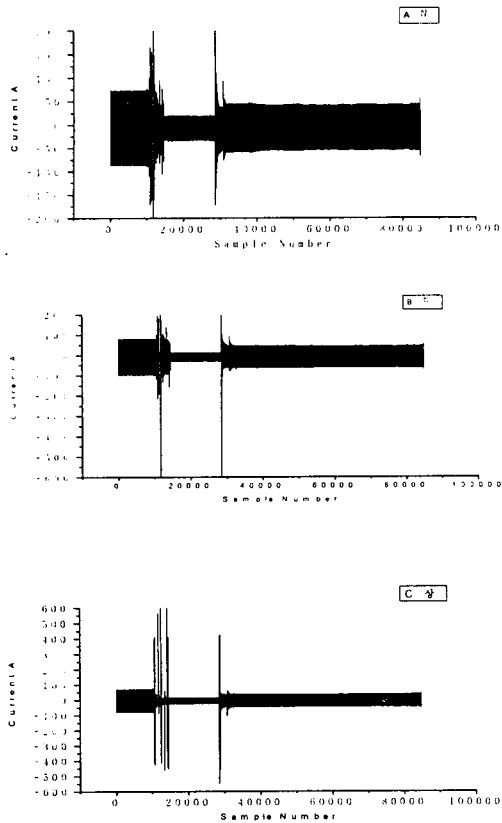


그림 32 재폐로 투입 인출 선로전류

### 3.2. 재폐로시에 발생하는 돌입전류 파형 분석

#### 3.2.1 선로 고장전류 파형 분석

그림 3.2의 파형 중에서 고장전류 부분을 확대하면 그림 3.3과 같다.

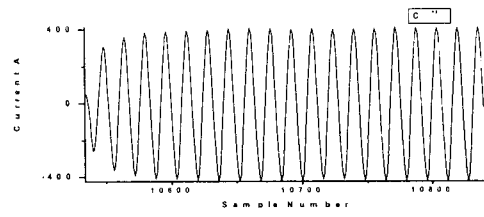
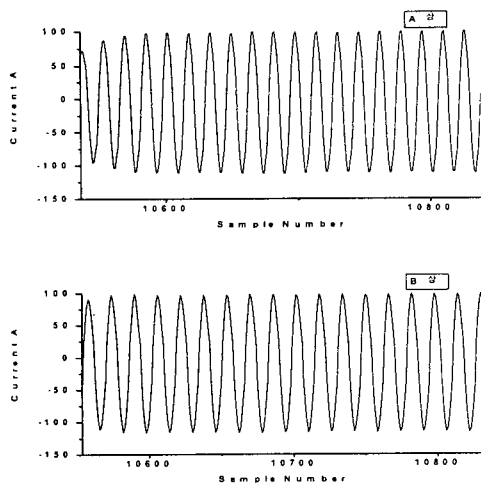


그림 33 실 배전계통의 고장전류 파형

상기 그림에서와 같이 실 배전계통의 고장전류 파형은 기본파와 크게 다를 바가 없으며 고 임피던스 고장에 의해 고장전류의 크기는 약간만 상승하고 있다. 이에 따른 고조파 해석을 수행하면 그림 3.4와 같다.

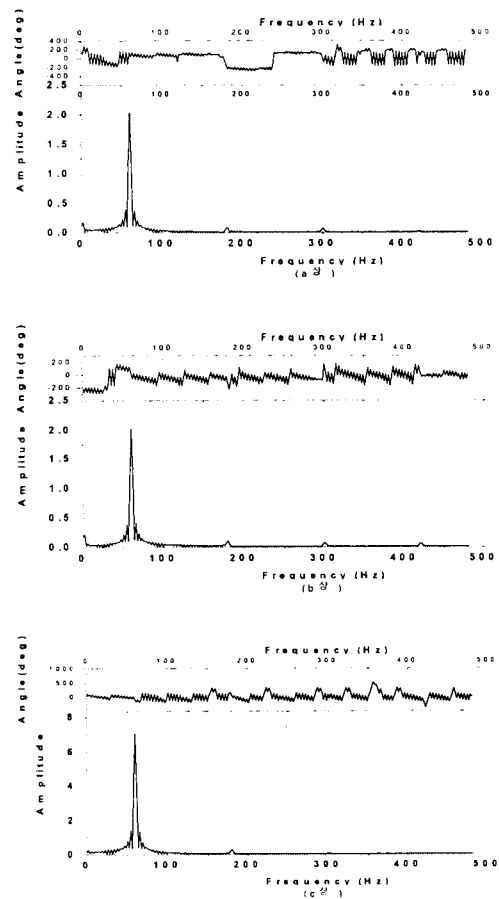


그림 34 고임피던스 고장전류 고조파 해석

#### 3.2.2 순시 재폐로 돌입전류 파형 분석

순시 재폐로 투입 시에 발생하는 돌입전류의 파형은 그림 3.5와 같고 그 때의 크기와 감쇠시간은 표 3.2와 같다. 또한 FFT 고조파 분석 파형은 그림 3.6에 나타나 있다

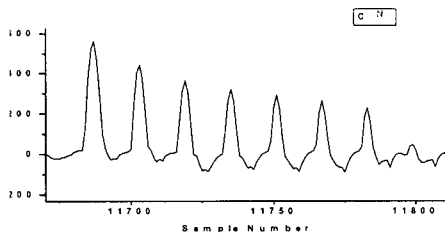
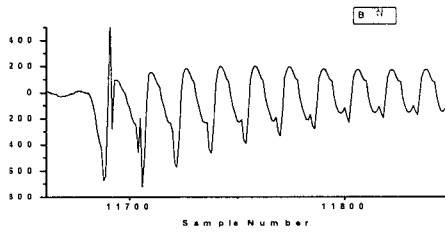
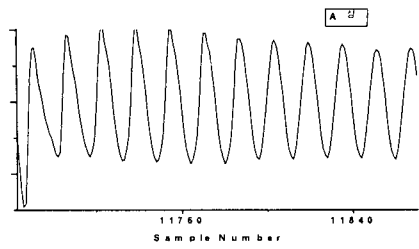


그림 35. 순시 재폐로시 돌입전류 파형

표 3.2. 순시 재폐로 시의 돌입전류 크기 및 감쇠시간

구분	A 상	B 상	C 상
돌입전류 크기	-288.49 A	-724 A	560 A
감쇠시간	13 cycle	8 cycle	7 cycle

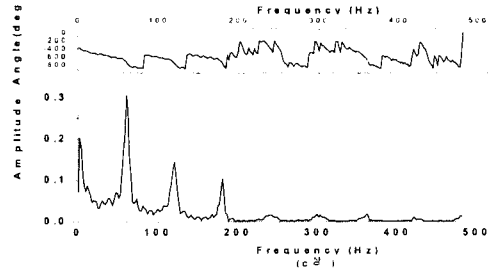
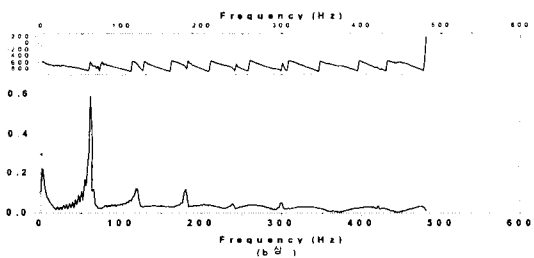
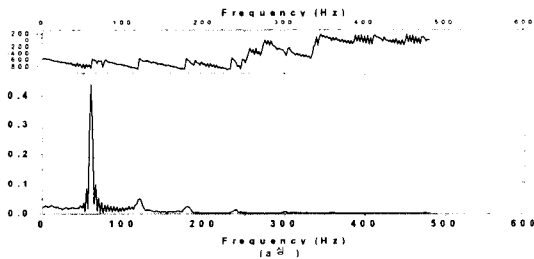


그림 36. 순시 재폐로 돌입전류 고조파 분석

### 3.2.3 한시 재폐로 돌입전류 파형 분석

한시 재폐로에 대한 돌입전류 분석 내용은 그림 3.7 표 3.3 그리고 그림 3.8에 나타나 있다.

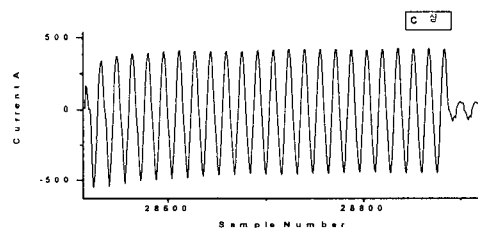
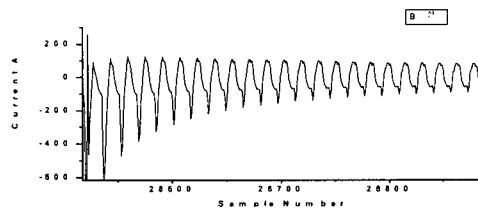
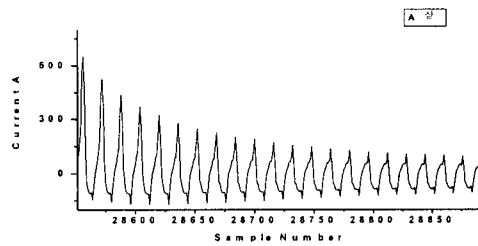


그림 37. 한시 재폐로시 돌입전류 파형

표 3.3. 한시 재폐로 시의 돌입전류 크기 및 감쇠시간

구분	A 상	B 상	C 상
돌입전류 크기	724.17 A	-692 A	-553 A
감쇠시간	36 cycle	27 cycle	9 cycle

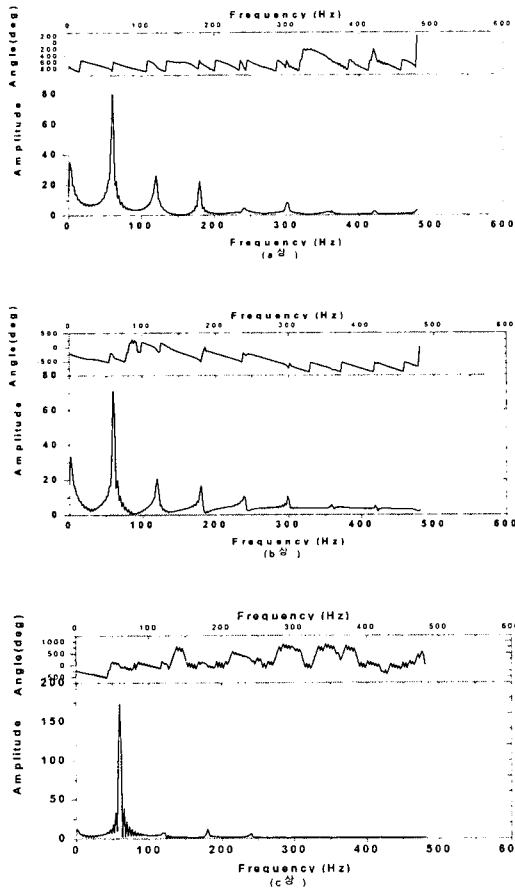


그림 3.8. 한시 재폐로시 돌입전류 고조파 분석

### 3.3. 고장전류와 돌입전류 파형 비교분석 (전류크기, 감쇠시간, 고조파)

표 3.4. 돌입전류 크기 비교

구분	최대	최소
고장 전류 크기	400 A	90 A
돌입 전류 크기	724 A(순시) 724.17 A(한시)	288.49 A(순시) 553 A(한시)

위와 같이 다양한 크기의 돌입전류가 나타나는데 이것을 오동작 보호회로에 이용하기는 어렵다.

표 3.5. 돌입전류의 감쇠시간 비교

구분	최대	최소
돌입 전류 감쇠 시간	13 cycle(순시) 36 cycle(한시)	7 cycle(순시) 9 cycle(한시)

배전계통은 주상 변압기 및 주변압기가 함께 쉼

여 있는 선로 상황 때문에 정확한 감쇠시간을 산출하기가 어려우므로 이를 오동작 보호 회로에 지연시간으로 이용하기에는 다소 어려운 면이 있다.

표 3.6. 고장전류와 돌입전류 고조파 크기 비교

	상 직류분	기본파	2조파	3조파	5조파	5조파	6조파
고장 전류	a	0.144	2.0	0.047	0.09	0	0.075
	b	0.228	2.0	0.034	0.062	0	0.09
	c	0.221	7.03	0.0233	0.321	0	0
순시 재폐로 돌입 전류	a	0.041	0.436	0.081	0.0353	0.0168	0.01
	b	0.304	0.597	0.152	0.122	0.0577	0.04
	c	0.198	0.303	0.1467	0.0954	0.0181	0.016
한시 재폐로 돌입 전류	a	26.19	79.1	18.44	22.3	3.6	11.29
	b	17.85	68.85	13.95	13.5	7.12	10.03
	c	9.19	174.0	8.0	8.0	6.7	3.1

위 표에서 알 수 있듯이 고장 전류는 고조파 성분이 거의 없고 대다수는 기본파가 차지하고 있으며 순시 재폐로 돌입전류는 기본파 성분과 비교하여 고조파 성분이 대체적으로 고르게 분포되어 있음을 알 수 있고 특히 제2고조파 성분이 크게 차지하고 있다. 따라서 순시 재폐로 돌입전류와 고장 전류를 분류하기 위해서 제2고조파 파형의 특징을 활용할 수 있음을 짐작할 수 있다.

한시 재폐로 돌입전류는 전체적으로 순시 재폐로 돌입전류보다는 크고 전 고조파 성분이 고르게 분포하고 있다. 특히 기본파 성분에 비해 직류분이 차지하는 비중이 아주 크므로 이를 활용하면 한시 재폐로에 고장전류와 구분하여 돌입전류로 인한 보호기기 오동작을 감소시킬 수 있음을 짐작할 수 있다.

표 3.7. 돌입전류 고조파 분석 결과  
(돌입전류에서는 기본파 제외)

구분	최대	최소
고장 전류 고조파 크기	70.3(기본파)	0.0233(2조파)
돌입 전류 고조파 크기	0.304(순시 직류분) 26.19(한시 직류분)	0.01(순시 5조파) 3.1(한시 5조파)

위의 표를 토대로 기본파를 기준으로 돌입전류의 각 상별 파형분석 결과에서 고조파 성분의 최대치를 산출하여 해석하면 표 3.8과 같다.

표 3.8. 돌입전류의 파형 분석치

구분	순시 재폐로	한시 재폐로
기본파	100 %	100 %
직류분	51	33
제2 고조파	25	23
제3 고조파	20.4	28
제4 고조파	19	13.7
제5 고조파	13	14.3

이처럼 직류분이 전반적으로 우세하며 순시 재폐로에서는 제2 고조파 성분이 우세하고 한시 재폐로에서는 제2 고조파와 제3 고조파 성분이 대등하게 분포함을 알 수 있다. 따라서 순시 재폐로에서는 직류분 성분과 제2 고조파 성분을 특징의 기준으로 하고 한시 재폐로에서는 고조파 성분의 크기를 우선 고려하여 제2 고조파와 제3 고조파의 요소를 특징의 기준으로 하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

이와 같이 돌입전류에 포함된 고조파 성분에 의해 고 정전류와 구분할 수 있도록 함으로서 배전 자동화 시스템의 오동작을 줄일 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 배전계통에서 발생 할 수 있는 돌입전류의 유형을 분석하고 변압기 돌입전류의 원인 및 돌입전류의 일반적인 특성을 해석하였으며, 배전계통에서 자주 발생하는 재폐로 동작시의 스위치 투입에 따른 돌입전류의 파형을 분석하였다. 이를 위해 수집된 배전계통의 고 임피던스 고장에 의한 리클로져 투입 시의 선로전류를 분석하였다.

본 연구분석결과를 정리하면 배전계통의 다양성으로 인하여 돌입전류의 크기로 순시 정정값을 결정하기 어렵고 한시 요소를 위한 돌입전류 감쇠시간의 일반적인 특성을 찾기가 어렵다고 인식되었지만 FFT분석에 의한 돌입전류의 특정 고조파 함유율은 고장전류와 구분할 수 있는 주요 인자가 될 수 있음을 확인하였다. 즉, 변압기 돌입전류에서는 직류분 성분과 제 2고조파 성분을 돌입전류 특징의 기준으로 하고 정전 후 일정시간이 경과 후에 투입되는 경우는 제 2 고조파와 제 3고조파 성분을 돌입전류 특징의 기준으로 설정하는 것이 유리함을 제시하게 되었다.

이상과 같은 연구 결과는 향후 국내의 배전계통의 실제 재폐로 투입 시의 다양한 돌입전류를 계속적으로 취득, 분석함으로써 돌입전류와 고장전류를 특정하게 구분할 수 있는 일반적인 방법을 제시한다면 배전 자동화 시스템의 신뢰도 향상에 크게 기여할 수 있으리라 생각된다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 한국전력공사 기술연구원, "국산 배전 자동화 시스템 실증 연구", 1, 2차 보고서, 1995, 6.
- (2) 산업자원부 보고서, "진단기능 내장형 자동화 개폐기 개발 최종 보고서", 1998, 11.
- (3) J. E. Holcomb, "Distribution Transformer Magnetizing Inrush Current", IEEE Trans. PAS VOL. PAS-80, Dec. 1961, Pp. 697-702
- (4) W. K. Sonnemann, C. L. Wagner, G. D. Rockefeller, "Magnetizing Inrush Phenomena in Transformer Banks", AIEE Trans. VOL. 77, Oct. 1958, Pp. 884-892
- (5) Theodore R. Specht, "Transformer Inrush and Rectifier Transient Current", IEEE Trans. PAS VOL. PAS-88, No. 4, Apr. 1969, Pp. 269-276
- (6) Kuniaki Yabe, "Power Differential Method for Discrimination between Fault and Magnetizing Inrush Current in Transformer", T. IEE Japan, VOL. 116-B, No. 3, 1996, Pp. 293-298
- (7) IEEE Power Relaying Committee, "Distribution Line Protection Practice-Industry Survey Result", IEEE Trans. on Power Delivery, VOL. 3, No. 2, Apr. 1998, Pp. 514-524
- (8) 한전 전력연구원, "제주지역 전력계통 안전성 향상을 위한 검토 결과 보고서(복제주 #2 Mtr 돌입전류에 의한 계통영향 분석)", 99 전력연-단 421, 1998, 8.
- (9) 한전 기술연구원 보고서, "다중 접지 배전선로 보호계전방식 개선에 관한 연구", 1997, 9.
- (10) James. J. Burke, "Power Distribution Engineering", Marcel Dekker, Inc, 1994.