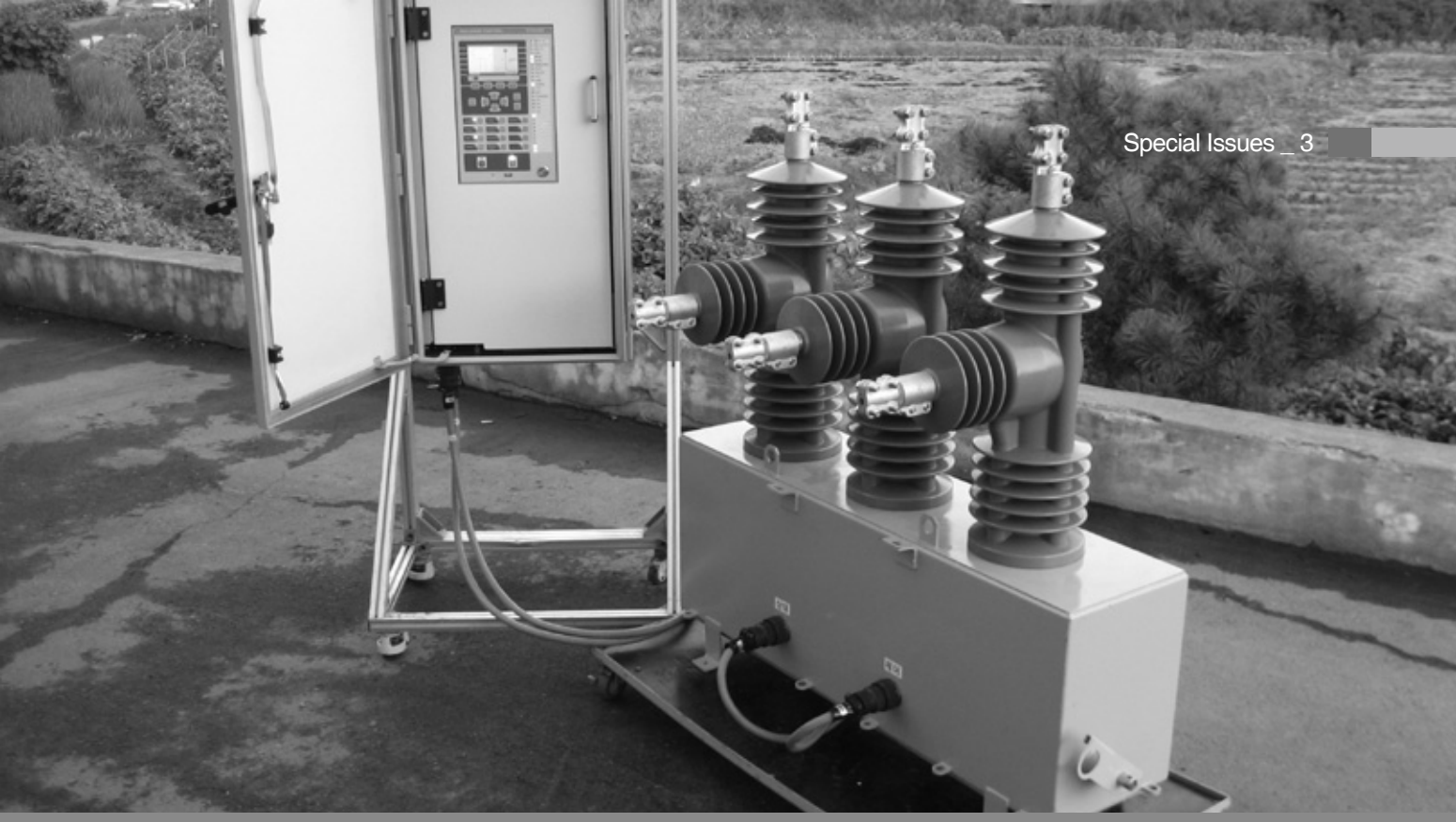


정전피해 최소화를 위한 Pulse활용 신개념 보호기기 개발

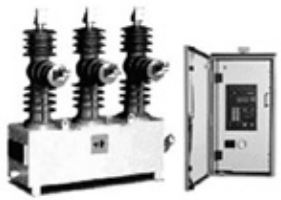
김동섭
KEPCO 배전운영처 배전팀장

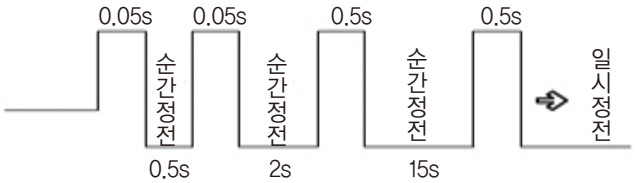
1. 개 황

전기를 공급하기 위한 배전선로에 까치, 수목접촉 등에 의한 정전이 발생할 경우 선로에 설치된 Recloser나 변전소의 CB에서 고장을 차단하여 정전확산을 예방하고 있다. 전 세계적으로 가장 많이 설치하여 운영하고 있는 Recloser는 계통에서 고장이 발생할 경우 미리 설정된 동작 책무(보통 2F2D)에 따라 재폐로 방식으로 실제 선로에 투입 · 개방을 진행해 고장을 제거한다.

이러한 Recloser는 국내의 전체 배전선로를 기준으로 0.63대/DL이 설치되어 있으며, 가공배전선로에는 0.8대/DL이 설치되어 있다.

[그림 1] Recloser 및 재폐로 동작 책무





Recloser | 2F2D 재폐로

[표 1] 전국 배전선로 및 Recloser 현황(2013년 9월 기준

구 분	배전선로(개)			Recloser(대)
	가 공	지 중	소 계	
수 량	7,622	1,815	9,437	5,965

2. 계통운영상 Recloser 개선 필요성

대전류 고장발생 시 Recloser의 최초 차단 후 선로의 고장유무 판단을 위해 다시 투입될 때, 고장 원인이 완전히 제거되지 않은 경우에는 선로의 고장전류가 일시적으로 실 계통에 유입되어 계통을 구성하는 기기와 설비에 손상을 줄 수 있다.

Recloser의 재폐로 동작에 의해 발생된 아크와 유입된 고장전류는 사고 열량(I2t)의 증가로 이어지고 전력계통 기기의 열화가 가속되어 Recloser 뿐만 아니라 계통에 장착된 전력기기와 부품 그리고 Fuse의 수명단축 원인이 된다. 또한 Recloser의 반복된 투입 · 개방 동작으로 전기를 사용하는 소비자 측에서는 이상전압 유입 같은 전력품질 저하와 순간정전 상태를 피할 수 없다.

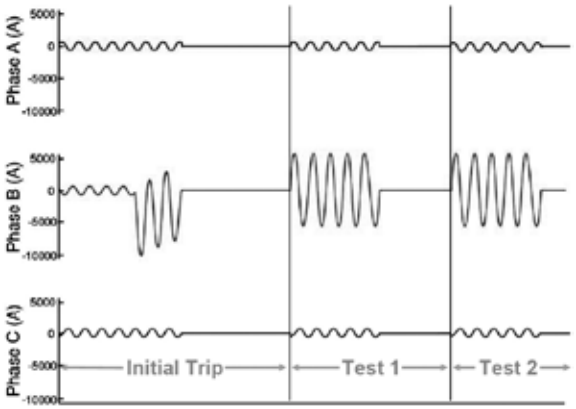
따라서, 기존 Recloser 재폐로 방식에 의해 발생하는 문제점을 최소화하기 위해서는 고장 발생 시 Rcloser 최초 개방 이후 선로의 고장진단을 위한 전류의 통전시간과 크기를 최소화하여 계통에 고장전류의 영향을 방지하는 것이 중요하다.

그리고 소비자 측의 이상전압과 추가 순간정전을 유발하는 기존 Recloser의 재폐로 고장진단 방법을 개선하는 것이 필요하다.

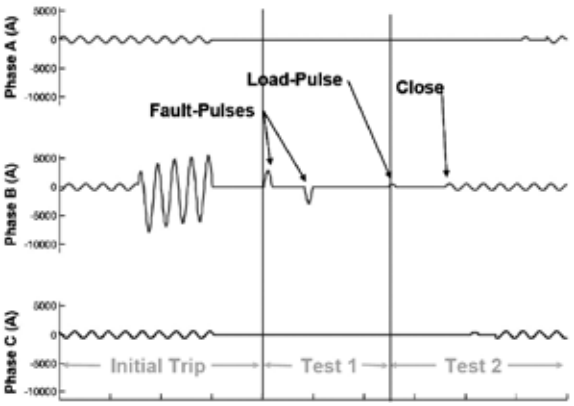
3. Recloser와 Pulse Recloser 비교

고장발생 시 최초개방 후 기존 Recloser는 **그림** 2와 같이 재폐로를 반복하면서 선로의 고장지속 여부를 진단한다. 고장진단을 위해 Recloser가 재폐로를 할 때마다 고장전류가 검출되며 이때마다 고장전류는 계통에 유입된다.

그러나 Pulse Recloser의 동작 원리를 나타내는 **그림** 3에서는 고장 발생 시, 최초 개방 후 고장 진단하는 과정에서 **그림** 2와 같은 고장 전류는 나타나지 않고 고장 전류에 비해 상대적으로 작은 크기의 Pulse가 일시적으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 Pulse Recloser가 최초 개방 후, 고장 진단을 하는 과정에서 기존의 Recloser 재폐로 방식과 다른 차



[그림 2] 기존 Recloser 동작 Sequence



[그림 3] Pulse Recloser 동작 Sequence

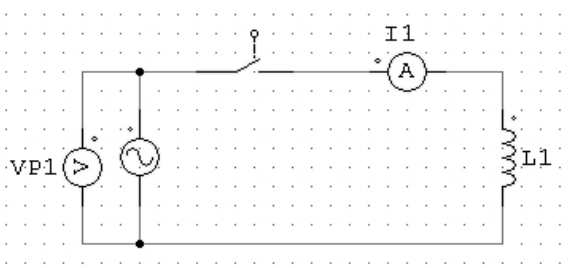
단기 Pulse(차단기의 3~8msec의 짧은 시간에 검출되는 고장 전류) 시험에 의해서 계통의 고장 상태를 진단하기 때문이다. 차단기의 Pulse 시험은 항상 고장 전류의 최대 피크 값을 지난 특정 시점에서 이루어지도록 위상 제어되기 때문에 고장 진단을 위한 전류의 크기 또한 상대적으로 적다.

Pulse의 크기가 고장판단을 위한 설정 값보다 크면 **그림 3**에 나타난 것처럼 Fault-Pulse로 간주되어 고장 상태로 판단하며, Pulse의 크기가 설정 값보다 적으면 Load-Pulse로 간주되어 고장이 복구된 정상 상태로 진단하여 투입이 이루어진다. 서로 반대 방향인 Pulse를 검출하여 고장상태 진단을 위한 Pulse 크기가 두 개 Pulse 모두에서 설정 값 보다 큰 경우, 해당 Pulse 값을 고장 전류로 판단하여 차단한다. 또한 두 개의 Pulse 중 처음 Pulse 크기는 설정 값보다 크지만 방향이 반대인 나중 Pulse의 크기가 설정 값보다 적을 경우, 투입 시 일시적으로 발생되는 돌입전류로 판단하여 투입하게 된다.

4. Pulse 송출을 위한 전압-전류 위상각 결정

재폐로 시 계통에 미치는 영향을 최소화하기 위해 두 번째 이후 고장판단은 Pulse 시험을 통해 결정하게 된다.

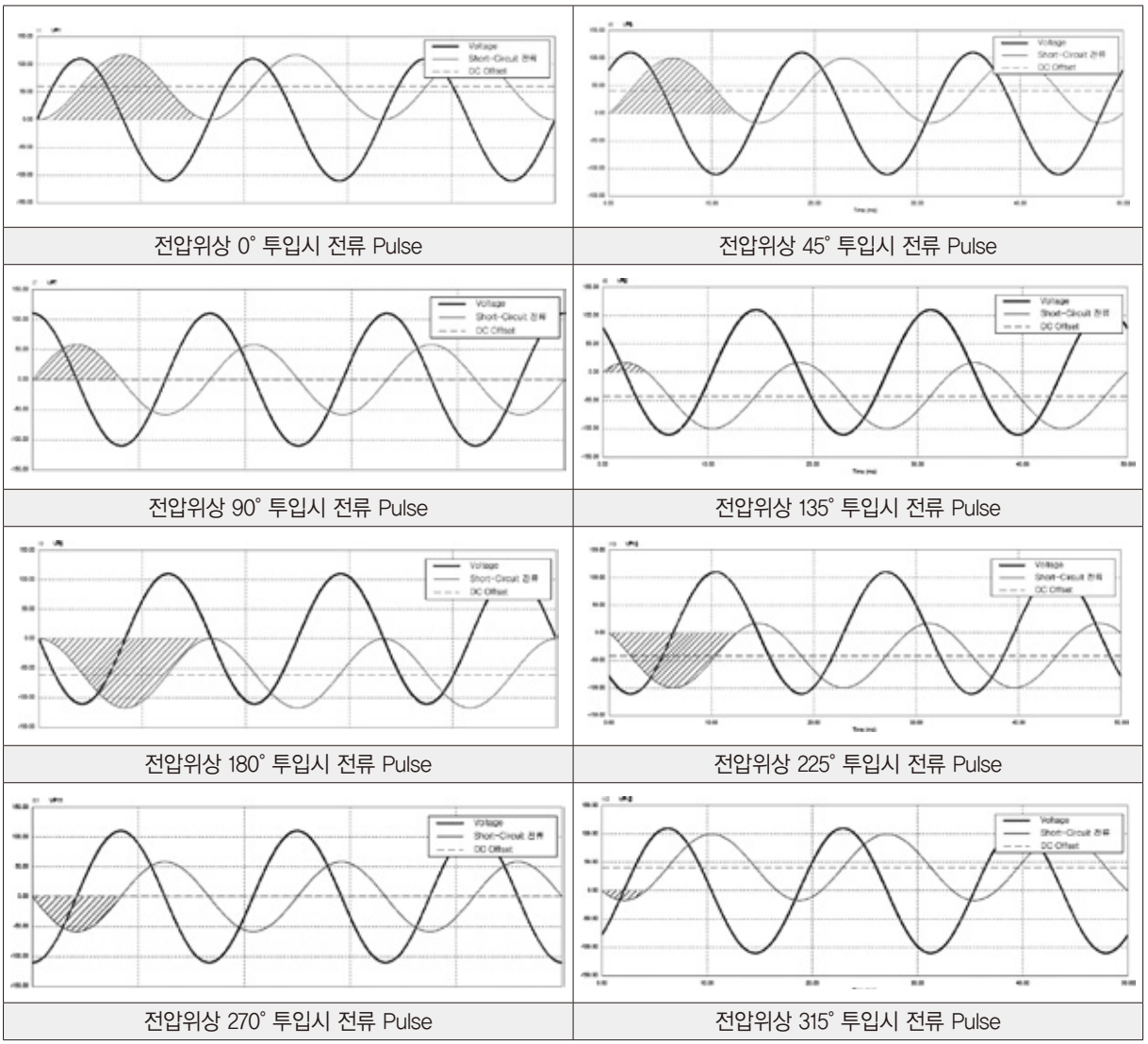
이때 고장판단을 위해서는 적절한 크기의 파형이 필요하다. 펄스 파형이 너무 크면 계통에 미치는 영향이 커지고 반대로 너무 적을 경우 고장판단에 어려움이 발생한다. **그림 4**는 부하 회로에서 Pulse 투입 위상에 따른 Short-circuit 전류 특성 및 사고 열량(I2t)을 파악하기 위해, P-Sim 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 한 것이다.



[그림 4] 투입 위상각 PSIM 모델링

Pulse 투입 위상을 0°, 45°(π/4), 90°(π/2), 135°(3π/4), 180°(π), 225°(5π/4), 270°(3π/2), 315°(7π/4)로 가변하여 시뮬레이션 할 경우, Short-circuit 전류 특성은 **그림 5**와 같다.

[그림 5] 전압-전류 위상에 따른 Pulse Energy 변화



전압위상 0° 투입시 전류 Pulse	전압위상 45° 투입시 전류 Pulse
전압위상 90° 투입시 전류 Pulse	전압위상 135° 투입시 전류 Pulse
전압위상 180° 투입시 전류 Pulse	전압위상 225° 투입시 전류 Pulse
전압위상 270° 투입시 전류 Pulse	전압위상 315° 투입시 전류 Pulse

Short-Circuit 전류의 평균값은 **계산식 1**과 같다.

[계산식 1]

$$I_{average} = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} i_{short-circuit}\, d(wt)$$

계산식 2를 이용하여, Pulse 전압 투입 위상이 0° 일 때의 Short-Circuit 평균 전류를 연산할 수 있다.

열량 연산식 I^2t에 평균 전류 및 시간을 대입하면, Pulse 전압 투입 위상이 0° 인 경우의 사고열량을 구할 수 있다. 단, 60Hz 계통으로 가정하여 시간은 1cycle(2π)의 시간인 약 0.0167초로 대입한다.

[계산식 2] $$I_{average(\theta=0^\circ)} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} I_m \sin(wt) - I_m \sin(-\frac{\pi}{2}) d(wt) = I_m[A]$$

[계산식 3]

$$I^2_{average(\theta=0^\circ)} \cdot t = 0.0167 I_m^2 \ [A^2 s]$$

계산식 2, 3과 동일한 방법으로, Pulse 투입 위상에 따른 Short-Circuit 평균 전류 및 사고 열량을 연산하면 표 2와 같다.

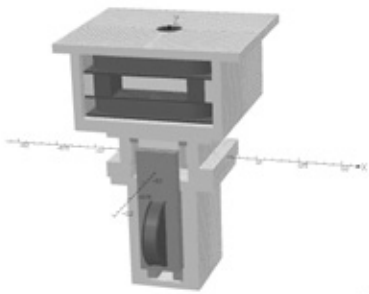
[표 2] Pulse 투입 위상에 따른 사고열량

Pulse 투입 위상	평균 전류 [A]	주기 [s]	사고 열량 [A^2s]
0°	I_m	0.0167	$0.0167 I_m^2$
45°	$1.007 I_m$	0.0125	$0.0128 I_m^2$
90°	$0.637 I_m$	0.0083	$0.0034 I_m^2$
135°	$0.1932 I_m$	0.0042	$0.00016 I_m^2$
180°	$-I_m$	0.0167	$0.0167 I_m^2$
225°	$-1.007 I_m$	0.0125	$0.0128 I_m^2$
270°	$-0.637 I_m$	0.0083	$0.0034 I_m^2$
315°	$-0.1932 I_m$	0.0042	$0.00016 I_m^2$

표 2를 통해 Pulse 전압 투입 위상(θ)이 ▲0°에서 180° 사이일 경우(0°≤θ<180°) ▲투입 위상이 180°에 가까울수록 ▲Pulse 전압 투입 위상(θ)이 180°에서 360° 사이일 경우(180°≤θ<360°) ▲투입 위상이 360°에 가까울수록 사고 열량이 적음을 알 수 있다. 또한 전류 계측을 통한 평균 전류 및 Pulse 투입 위상을 알 수 있다면 적은 사고 열량만으로도 Short-Circuit의 Peak 전류 및 RMS 전류를 역으로 연산할 수 있다. 단, 펄스 전압 투입 주기가 짧으면 사고 열량은 적으나 평균 전류 취득 시 오차가 발생하므로 135° 및 315°에서 펄스 전압을 투입하는 것이 적정하다.

5. Pulse Relcoser 구조

일반적인 재폐로 대신 Pulse 신호를 발생하기 위해서는 Recloser 차단부의 메카니즘 구조를 이전과는 다르게 해야 한다. 따라서 Pulse Recloser의 기기 재폐로와 Pulse 송출을 위해 PMA와 EMA방식을 혼용한 하이브리드 형태의 메카니즘 구조를 개발하였다. Pulse 신호는 정확한 투입각 제어를 필요로 하며, 정밀한 제어를 할 수 있는 드라이버 또한 개발되었다. 그림 6은 펄스 기능부 Recloser의 차단부 메카니즘 구조를 보여주고 있다.



[그림 6] Pulse Recloser 메카니즘 구조

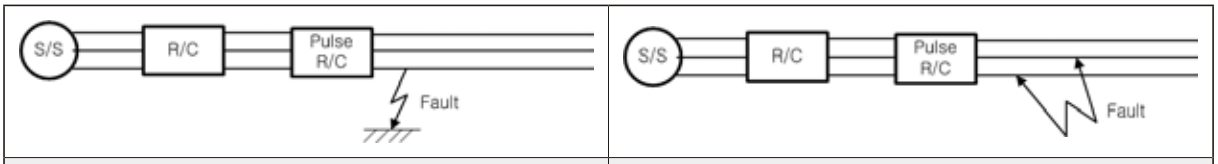
6. 현장 실증결과

개발된 Pulse 기능부 Recloser는 고창 전력시험장에 설치하고 AFG 장비를 이용하여 고장 모의시험을 수행하였다. 그림 7은 Pulse 기능부 Recloser의 설치 사진과 AFG를 이용한 고장 모의환경을 보여주고 있다.

[그림 7] Pulse Recloser 본체 · 제어함 및 AFG (고장발생장치) 설치

그림 8은 고장 모의 계통도이며, 단락과 지락 고장 시 Pulse Recloser 동작 상태를 확인할 수 있다.

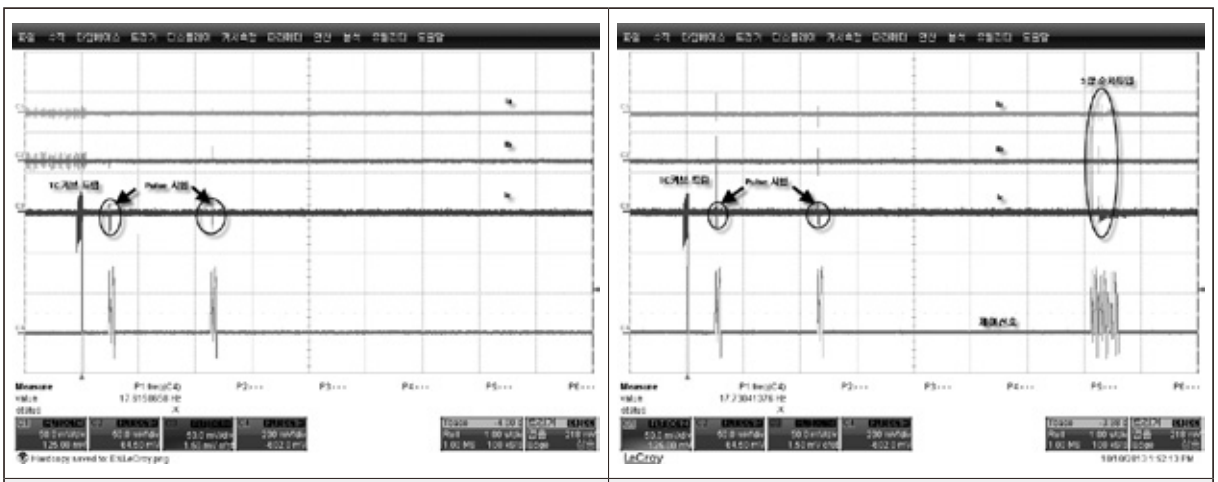
[그림 8] 고장 모의계통도



지락 모의계통도 | 단락 모의계통도

[표 3] 고장 유형별 실증결과

실증	시험유형	고장 전류	설정 및 동작책무	시험결과
1	C 상 지 락 일 시	200A 3초	• Lockout 설정 3회 • 책무:O–P–P–Lo	개방 후 2회 Pulse 시험 및 Lockout
2	C 상 지 락 순 간	200A 3초	• Lockout 설정 4회 • 책무:O–P–P–C–Reset	개방 후 2회 Pulse 측정 후 고장원인이 해소되어 A–B–C 순차 투입하여 재폐로 성공함
3	B C 단 락 순 간	200A 0.5초	• Lockout 설정 3회 • 책무:O–C–Reset	개방 후 1회 Pulse 시 고장원인 제거되어 A–B–C 순차 투입
4	B C 단 락 일 시	200A 3초	• Lockout 설정 3회 • 책무:O–P–P–Lo	개방 후 1회 ,2회 재폐로 펄스시험으로 고장을 검출하여 Lockout 됨
5	Fuse 20A	115A 3초	• Lockout 설정 2회 • 책무:O–P–C–Reset	Fuse 미융단 상태에서 Pulse 송출 후 고장이 검출되지 않아 재폐로 지연동작 시 Fuse 융단되어 A–B–C 순차 투입



C상 일시고장 기록 파형 | C상 순간고장 기록 파형

[그림 9] 고장유형별 Pulse Recloser 기록 파형

고장유형별 시험결과는 표 3에 나타나 있다. 지락고장 및 단락고장에 대해 Pulse 기능부 Recloser는 일시고장과 순간고장을 제대로 판단하였으며, 퓨즈 협조에 대해서도 만족할 수 있는 결과를 보였다. 현장 시험 시 취득된 펄스 파형을 분석한 결과 PSCAD 시뮬레이션과 거의 유사한 패턴을 보였으며 향후 시뮬레이션을 통한 더 많은 사례 연구를 통해 알고리즘을 보완할 예정이다.

그림 9에 의하면 일시고장의 경우 첫 번째 Trip은 Recloser와 동일하게 고장을 감지 후 Fast 동작에서 개방되지만, 이후 Pulse Energy를 통해 고장상태를 진단하여 재폐로가 Lockout 되고, 순간고장의 경우에는 두 번째 Pulse 이후 고장이 해소되어 Pulse Recloser가 투입되는 동작 책무를 보여주고 있다.

7. 전 망

기존 Recloser의 단점을 보완한 Pulse Recloser의 개발을 통해 배전 시스템의 신뢰성 및 전력 품질 향상을 기대할 수 있게 되었다. Pulse Recloser의 개발로 보호기기 간의 제한적인 협조 조건을 극복한 배전 자동화 시스템의 성능과 신뢰성 향상을 이루었다. 또한 Pulse를 이용하여 개선된 고장 진단 및 복구 방법이 개선되었고 이는 계통연결 전력기기 및 설비 피해 감소로 이어져 현재 국가산업 성장에 따른 전력 수요 증대에 적절히 대응 할 수 있을 것으로 전망된다.