

태양광전원 연계용변압기의 결상사고 검출 보호장치 구현 및 특성 분석

강갑석*, 노대석**

*한국폴리텍대학, **한국기술교육대학교

e-mail:seok0826@kopo.ac.kr

Implementation and Characteristics of Protection device for Open Phase Fault in Grid-Connected Transformer for PV System

Kab-Seok Kang*, Dea-Seok Rho**

*Korea Polytechnics, **Korea University of Technology and Education

요약

최근, 정부는 온실가스의 실질 배출량을 제로로 만드는 ‘탄소 중립’ 달성과 안전하고 깨끗한 에너지정책 전환을 위해, 원자력 발전과 석탄화력을 점진적으로 감축하고, 2040년까지 신재생에너지 발전량 비중을 30~35%로 확대하는 정책을 적극적으로 추진하고 있다. 이에 따라 태양광전원 등의 신재생에너지 전원도입이 발전사업자들에 의해 급격히 증가하고 있다. 그러나, 태양광전원이 설치된 배전선로의 단선 등으로 결상사고가 발생할 경우, 태양광전원 연계용 변압기의 철심형태 및 결선방법에 따라 여러 가지 문제점이 발생할 수 있다. 즉, 결상사고 발생 시, 결상된 상에도 전압이 유지되어 인버터의 단독운전 방지기능이 작동하지 않아, 결상된 상에 계속하여 전력이 공급되고 계통에 악영향을 주는 사례 등이 보고되고 있다. 또한, 결상사고 발생 시 변압기의 철심형태 및 결선방법에 따라 결상된 상에 전원을 공급할 수 있어, 전압측정만으로 결상사고를 검출하는 것은 매우 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 현상을 해석하고 결상사고를 검출하기 위하여, 태양광전원, 인버터, 연계용변압기, 수용가부하로 구성된 축약된 배전계통과 결상사고 검출 보호장치를 구현한다. 상기의 결상사고 검출 보호장치를 바탕으로 연계용변압기의 철심형태 및 결선방법에 따라 특성시험 수행하여, 제안한 결상사고 검출 보호장치가 결상보호에 유용함을 확인한다.

1. 서론

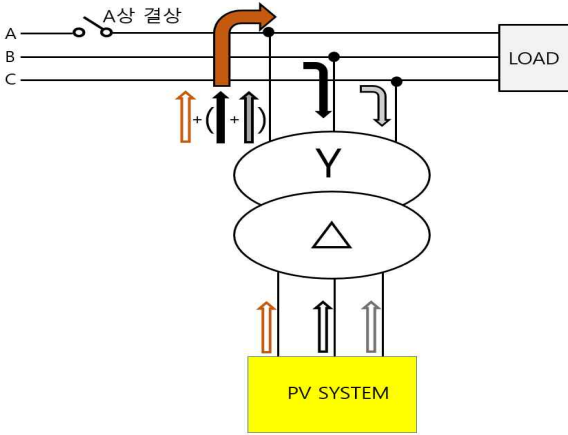
최근, 정부는 온실가스의 실질 배출량을 제로로 만드는 ‘탄소 중립’ 달성과 안전하고 깨끗한 에너지정책 전환을 위해, 원자력 발전과 석탄화력을 점진적으로 감축하고, 2040년까지 신재생에너지 발전량 비중을 30~35%로 확대하는 정책을 적극적으로 추진하고 있다. 이에 따라 태양광전원 등의 신재생에너지 전원도입이 발전사업자들에 의해 급격히 증가하고 있다. 그러나, 태양광전원이 설치된 배전선로의 단선 등으로 결상사고가 발생할 경우, 태양광전원 연계용 변압기의 철심형태 및 결선방법에 따라 여러 가지 문제점이 발생할 수 있다. 즉, 결상사고 발생 시, 결상된 상에도 전압이 유지되어 인버터의 단독운전 방지기능이 작동하지 않아, 결상된 상에 계속하여 전력이 공급되고 계통에 악영향을 주는 사례 등이 보고되고 있다. 또한, 결상사고 발생 시 변압기의 철심형태 및 결선방법에 따라 결상된 상에 전원을 공급할 수 있어, 전압측정만으로 결상사고를 검출하는 것은 매우 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 현상을 해석하고 결상사고를 검출하기 위하여, 태양광전원, 인버터, 연계용변압기, 수용가부하로 구성된

축약된 배전계통과 결상사고 검출 보호장치를 구현한다. 상기의 결상사고 검출 보호장치를 바탕으로 연계용변압기의 철심형태 및 결선방법에 따라 특성시험 수행하여, 제안한 결상사고 검출 보호장치가 결상보호에 유용함을 확인한다.

2. 태양광전원 연계용변압기의 결상사고 문제점 분석

변압기의 구조는 크게 권선과 철심으로 구성되어 있으며, 권선의 결선방식과 철심 구조에 따라 전기적인 특성이 다르게 나타나고 있다. 한편, 태양광전원 연계용 변압기는 Y- Δ 결선방식을 주로 사용하고, 일부는 Y-Y 결선방식을 사용하며, 현장에서 많이 채용하고 있는 철심구조는 3각 철심 구조이다. 이와 같이, 3각 철심형태에 Y- Δ 결선방식이나, Y-Y 결선방식을 사용할 경우 태양광전원이 연계된 배전계통에서 배전선로의 1상이 단선되는 등의 결상사고가 발생하면, 태양광전원이 계통에서 분리되어야 한다. 하지만, 그림 1과 같이 결상사고를 감지하지 못하고 계속 발전하는 현상(단독운전)과 계통연계용 변압기의 역조류 현상으로 인해 배전선로의

결상된 상으로 전력을 공급하여, 연계용변압기의 과부하, 전력량계의 오차발생, 보호계전기 오·부동작, 감전사고 등의 문제점이 발생할 수 있다.

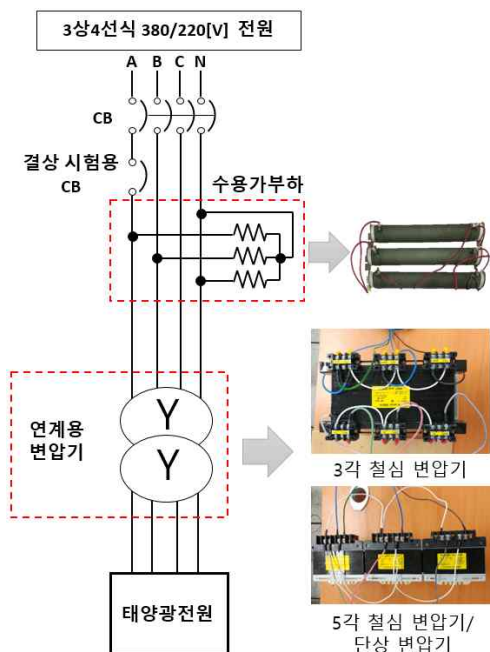


[그림 1] 연계용변압기의 결상사고 시 전기적 현상

3. 태양광전원 연계용변압기의 결상사고 검출 보호장치 구현

3.1 배전계통부

태양광전원이 연계된 배전계통에서 한 상이 단선되는 결상사고의 경우, 제안한 결상사고 검출 보호장치가 연계용변압기의 결상방식 및 철심구조별로 결상보호에 유용함을 확인하기 위하여, 그림 2와 같이 연계용변압기, 수용가부하로 구성되어 있는 축약된 배전계통을 구현한다.

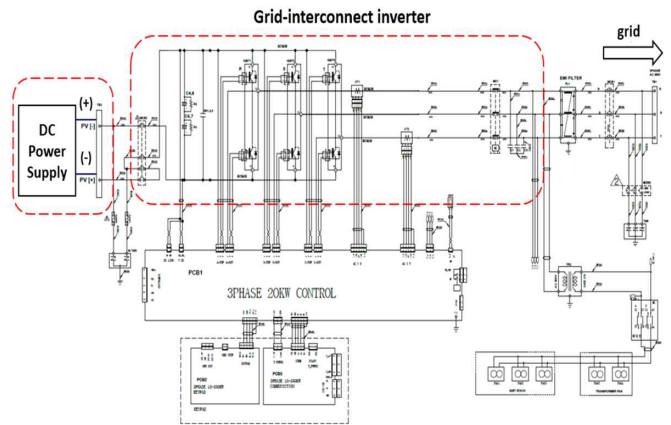


[그림 2] 배전계통부 회로도

이 그림에서와 같이, 축약된 배전계통은 3상4선식 380/220V 전원을 사용하며, 연계용변압기, 결상시험용 CB, 그리고 저항부하로 구성된다. 여기서, 연계용변압기의 권수비는 1:1이고, 철심구조는 3상 3각 철심 3[kVA]와 단상 변압기 1[kVA] 3대로 구성된 5각 철심 변압기 형태로 구성한다. 또한, 결상 시 전력조류에 의한 결상사고 검출 보호장치의 동작특성을 확인하기 위하여, 변압기 1차측에 저항부하 2,400W(800W×3)를 연결한다.

3.2 태양광전원부

태양광전원을 모의하기 위하여, DC 전원 공급장치를 사용하여 계통연계형 인버터에 전원을 공급한다. 계통연계형 인버터는 3상 380V의 AC로 변환하여 전력계통과 연계되도록 구현한다. DC 전원 공급장치와 3상 계통연계형 인버터를 포함한 태양광발전 제어장치를 나타내면 그림 3과 같다.



[그림 3] 태양광전원부 회로도

3.3 결상사고 검출 보호장치부

연계용변압기의 1차측 전류와 2차측 전류는 정상상태에서 항상 동일한 값을 가진다. 그러나, 결상사고 발생 시 인버터의 단독운전 현상과 연계용변압기의 역조류 현상으로 인해, 연계용변압기 1, 2차측의 전류값은 달라지게 된다. 따라서 연계용변압기 1, 2차측 전류를 비교하는 전류비교방식을 이용하면 기존방식에서 검출하기 어려운 결상사고를 판단할 수 있다. 전류비교방식의 개념을 이용하여, 그림 4와 같이 연계용변압기 1, 2차측에 변류기(CT)를 설치하고 1, 2차측의 전류와 위상을 비교하여 결상사고를 검출하는 보호장치를 구현한다. 상기에서 제안한 결상사고 검출 보호장치의 세부적인 동작 알고리즘을 나타내면 다음과 같다. 먼저, 변압기 1차측 및 2차측의 전류를 측정하고, 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 동작전류 (I_d)와 제한전류 (I_r)를 산정한 후, 식 (3)과 같이 동작 기율기 (O_s)를 구한다.

$$I_d = |I_1 - I_2| \quad (1)$$

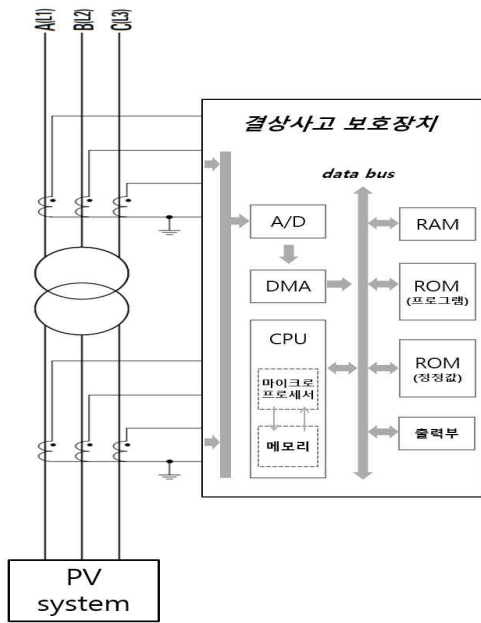
$$I_r = |I_1| + |I_2| \quad (2)$$

$$O_s = \frac{|I_1 - I_2|}{|I_1| + |I_2|} \times 100 \quad (3)$$

여기서, I_d : 동작전류, I_r : 제한전류, I_1 : 변압기 1차측의 전류, I_2 : 변압기 2차측의 전류, O_s : 동작 기울기(Operating Slope)

또한, 외부 지락사고에 의한 오동작을 방지하기 위해, 변압기 1차측 전류의 불평형률을 식 (4)과 같이 산정하고, 이 값이 정정치 이상일 경우에만 결상사고로 판단하여, 보호장치를 동작시킨다.

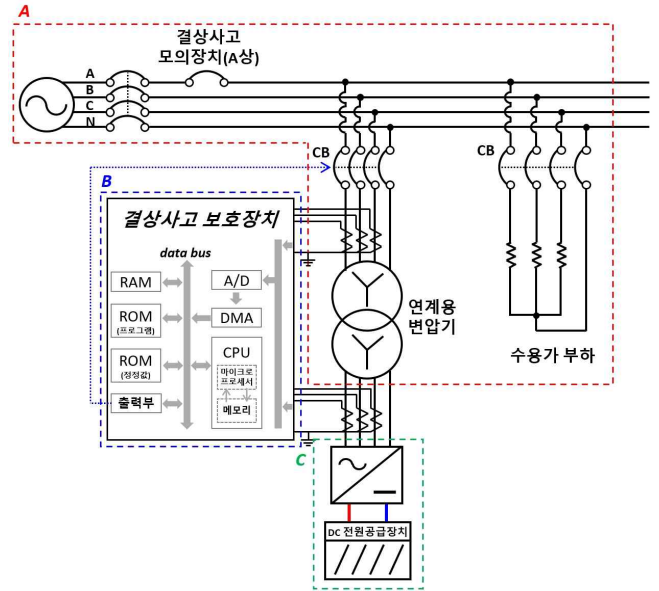
$$U_r = \frac{|\max(I_1)| - |\min(I_1)|}{(|I_{1,a}| + |I_{1,b}| + |I_{1,c}|) \times \frac{1}{3}} \times 100 \quad (4)$$



[그림 4] 결상사고 검출 보호장치 회로도

3.4 전체계통 모델링

상기의 내용을 바탕으로 태양광전원이 연계된 전체 시스템 구성도는 그림 5와 같다. 여기서, 그림 5의 A부분은 배전계통부, B부분은 결상사고 검출 보호장치부, C부분은 태양광전원부를 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이, 변압기 양단의 변류기 사이에 결상사고 검출 보호장치를 연결하여 전류의 크기 및 위상을 측정하고, 결상사고 모의장치(CB)에서 결상사고를 발생시킨 후 결상사고 검출 보호장치의 동작특성을 확인한다.



[그림 5] 전체 시스템 구성도

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 구현한 결상사고 검출 보호장치가 연계용변압기의 결선방법 및 철심 구조별로 결상보호에 유용함을 확인하기 위하여, 각 구성요소의 시험 조건은 표 1, 표 2와 같이 상정한다. 표 1에서 3각 철심 변압기는 3상 3kVA를 사용하고, 또한 5각 철심 변압기는 단상변압기 1kVA 3대로 5각 철심 변압기 형태로 구성되어 사용한다. 또한, 보호장치의 동작 기울기와 1차 전류 불평형률은 30[%]로 설정하고, 결상사고는 A상이 단선된 경우로 상정한다.

[표 1] 연계용변압기 및 부하용량 파라미터

구분	3각 철심	5각철심(단상변압기)
상수	3상	단상
변압기용량[kVA]	3kVA × 1대	1kVA × 3대
주파수[Hz]	60	60
변압비	1: 1	1: 1
부하용량[W]	2,400	2,400
태양광용량[W]	1,200	1,200

[표 2] 연계용변압기 및 부하용량 파라미터

항목	설정값
동작기울기	30[%]
불평형률	30[%]

4.2 결상사고 보호장치 특성 분석

(1) Y-Y 결선방식 변압기의 결상사고 보호장치 특성 분석
연계용변압기 결선방법이 Y-Y 결선인 경우, 변압기의 1차

즉 A상이 단선되는 결상사고에 대하여 보호장치의 동작 특성을 철심 구조별로 나타내면 표 3과 같다. 여기서, 표 3의 (a)는 전압 유기 특성을 나타내고 있으며, 5각 철심과 단상변압기의 경우, 변압기 1, 2차측 모두 0[V]로 전압이 유기되지 않아 태양광전원 인버터의 단독운전 방지기능에 따라 발전을 정지함을 알 수 있으나, 3각 철심인 경우에는 결상된 A상 변압기 1, 2차측 모두 211~216[V] 전압이 유기되어 전압 측정으로 결상사고를 검출할 수 없음을 알 수 있었다. 또한, 표 2의 (b)는 보호장치 동작 특성을 나타내고 있으며, 변압기가 3각 철심인 경우에는 결상된 A상에 3.2°~2°[A]의 전류를 공급하며, 제안한 결상사고 보호장치의 설정값인 30[%]를 초과하여 결상검출이 가능함을 알 수 있었다. 즉 Y-Y 결선의 3각 철심 변압기는 전압측정으로 결상사고를 검출할 수 없으며, 제안한 결상사고 보호장치를 이용하여 결상사고를 검출하여야함을 알 수 있다.

[표 3] Y-Y 결선 변압기의 결상사고 보호장치 특성
(a) 전압 유기 특성

구분	3각 철심			5각철심(단상변압기)		
	A-N	B-N	C-N	a-n	b-n	c-n
TR1차[V]	211	219	221	0	220	221
TR2차[V]	216	221	221	0	219	221

(b) 보호장치 동작 특성

구분	3각 철심			5각철심(단상변압기)		
	A상	B상	C상	A상	B상	C상
TR1차[A]	3.2°~2°	1.6°~75°	1.3°65°	0	0	0
TR2차[A]	1.5°4°	1.6°~141°	1.5°114°	0	0	0
동작기율기	36.4	54.4	41.9	-	-	-
불평형률	93.4			-		
동작유무	보호기기 동작			-	-	-

(2) Y-△ 결선방식 변압기의 결상사고 보호장치 특성 분석
연계용변압기 결선방식이 Y-△ 결선방식인 경우, 변압기의 1차측 A상이 단선되는 결상사고에 대하여 보호장치의 동작 특성을 철심 구조별로 나타내면 표 4와 같다. 여기서, 표 4의 (a)는 전압 유기 특성을 나타내고 있으며, 철심구조와 상관없이 결상된 A상에 TR 1, 2차측 모두 211~221[V] 전압이 유기되어 전압측정으로 결상사고를 검출할 수 없음을 알 수 있었다. 또한, 표 4의 (b)는 보호장치 동작 특성을 나타내고 있으며, 모든철심 구조에서 제안한 결상사고 보호장치의 설정값인 30[%]를 초과하여 결상검출이 가능함을 알 수 있었다. 즉 Y-△ 결선일 경우 철심구조와 상관없이 전압측정으로 결상사고를 검출할 수 없으며, 제안한 결상사고 보호장치를 이용하여 결상사고를 검출하여야함을 알 수 있다.

[표 4] Y-△ 결선 변압기의 결상사고 보호장치 특성
(a) 전압 유기 특성

구분	3각 철심			5각철심(단상변압기)		
	A-N/a-b	B-N/b-c	C-N/c-a	A-N/a-b	B-N/b-c	C-N/c-a
TR1차[V]	211	219	221	0	220	221
TR2차[V]	216	221	221	0	219	221

(b) 보호장치 동작 특성

구분	3각 철심			5각철심(단상변압기)		
	A상	B상	C상	A상	B상	C상
TR1차[A]	3.2°1°	2.2°~66.5°	1.3°71.5°	3.2°1°	1.7°~64.6°	1.5°68.5°
TR2차[A]	2.4°~31.9	3.3°~163°	3.1°87°	2.4°~33°	3.3°~167°	3.2°85°
동작기율기	39.4	55.1	41.4	39.5	59.1	40.6
불평형률	85			79.7		
동작유무	보호기기 동작			보호기기 동작		

5. 결 론

본 논문에서는 태양광전원이 연계된 배전선로의 단선 등으로 결상사고가 발생할 경우, 결상사고를 검출하기 위해 결상사고 검출 보호장치를 구현하고, 이를 바탕으로 특성시험을 수행한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 연계용변압기가 Y-△결선방식인 경우, 모든 철심 구조에서 결상사고 발생 시 결상된 상에 전압을 유기하므로, 본 논문에서 제안한 결상사고 검출 보호장치로 결상사고를 검출해야 함을 알 수 있었다.

(2) 연계용변압기가 Y-Y결선방식인 경우, 3각 철심 구조에서 결상사고 발생 시 결상된 상에 전압을 유기하므로, 본 논문에서 제안한 결상사고 검출 보호장치로 결상사고를 검출해야 함을 알 수 있었다.

(3) 결상사고로 인하여 계통에 악영향을 주는 문제점을 방지하기 위하여, 연계용변압기의 결선방식 및 철심 구조에 따라 적절한 결상사고 보호장치가 채용되어야 함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20191210301940)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 장수형, "전력변환장치 기반 분산전원이 도입된 배전계통의 새로운 보호방식", 충북대학교 학위논문, 2017년.
- [2] 신동열, 하복남, 정원욱, 차한주, "배전계통에서 변압기 결선에 의한 역 조류 현상에 관한 연구", 조명설비학회논문지 제22권 제9호, pp. 111-119, 2008년.