

PSCAD/EMTDC에 의한 태양광전원 연계용변압기의 결상사고용 보호장치 모델링에 관한 연구

강갑석*, 노대석**

*한국폴리텍대학, **한국기술교육대학교

e-mail: seok0826@kopo.ac.kr

A Study on Protection device modeling of Open Phase Fault in Distribution with PV System Based on PSCAD/EMTDC

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

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

요약

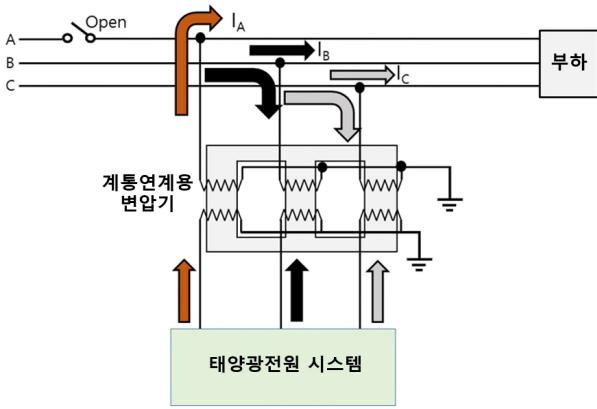
최근, 에너지 고갈과 기후변화 문제로 인하여 태양광전원 등 신재생에너지 보급이 매년 증가되고 있다. 그러나, 태양광전원이 설치된 배전선로의 단선 등으로 결상사고가 발생할 경우, 연계용 변압기의 철심형태 및 결선방법에 따라 여러 가지 문제점이 발생할 수 있다. 즉, 결상사고 발생 시, 결상된 상에도 전압이 유지되어 인버터의 단독운전방지기능이 작동하지 않아, 결상된 상에 계속하여 전력이 공급되고 계통에 악영향을 주는 사례 등이 보고되고 있다. 또한, 결상사고 발생 시 변압기의 철심형태 및 결선방법에 따라 결상된 상에 전원을 공급할 수 있어, 전압측정만으로 결상사고를 검출하는 것은 매우 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 현상을 해석하고 결상사고를 검출하기 위하여, PSCAD/EMTDC S/W를 이용하여 태양광전원, 인버터, 연계용변압기, 수용가부하로 구성된 배전계통과 결상사고 보호장치의 모델링을 수행한다. 상기의 모델링을 바탕으로 연계용변압기의 철심형태 및 결선방법에 따라 시뮬레이션을 수행한 결과, 결상시에도 결상된 상에 전력이 공급되는 현상을 확인하고, 제안한 결상사고 보호장치가 결상검출 및 계통보호에 유용함을 확인하였다.

1. 서론

최근 에너지 고갈과 기후변화 문제로 인하여 태양광전원 등 신재생에너지 보급이 매년 증가되고 있다. 그러나, 태양광전원이 설치된 배전선로의 단선 등으로 결상사고가 발생할 경우 연계용변압기의 철심형태 및 결선방법에 따라 여러 가지 문제점이 발생할 수 있다. 즉, 결상사고 발생 시 결상된 상에 전압을 유지시켜 인버터의 단독운전방지기능이 작동하지 않아 결상된 상에 전력을 공급하여 계통에 악영향을 주는 사례, 연계용변압기를 통해 역조류 현상이 발생하여 변압기 과부하 및 전력량계 계량오차 문제 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 이런 현상을 해석하여 결상사고를 검출하기 위하여, PSCAD/EMTDC S/W를 이용하여 태양광전원, 인버터, 연계용변압기, 수용가부하로 구성된 배전계통과 결상사고 보호장치 모델링을 수행한다. 상기의 모델링을 바탕으로 연계용변압기의 철심형태 및 결선방법에 따라 시뮬레이션을 수행한 결과, 결상사고 해석 및 결상검출에 유용함을 확인하였다.

2. 태양광전원 연계용변압기의 결상사고 특성

변압기의 구조는 크게 권선과 철심으로 구성되어 있으며, 권선의 결선방식과 철심 구조에 따라 특성이 다르게 나타나고 있다. 특히, 태양광전원 연계용 변압기는 Y- Δ 결선방식을 주로 사용하고, 일부는 Y-Y 결선방식을 사용하며, 철심구조는 대부분 3각 철심 구조를 사용하고 있다. 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 공급하는 문제점이 발생할 수 있다[3]. 특히, 결상사고 발생 시 변압기의 철심형태 및 결선방법에 따라 결상된 상에 전원을 공급할 수 있어, 전압측정만으로 결상사고를 검출하는 것은 매우 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 태양광전원 연계용변압기의 결선방식과 철심구조에 따라 결상사고를 검출할 수 있는 결상사고 보호장치를 제안하고자 한다.

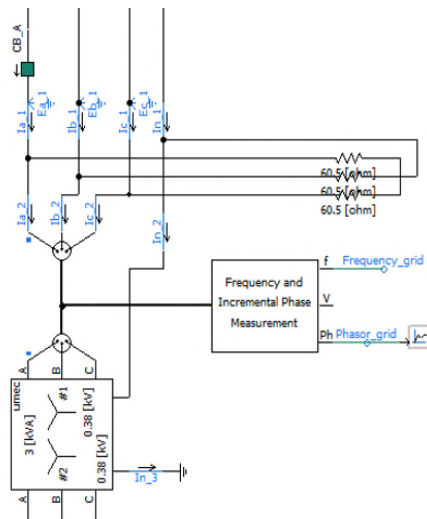


[그림 1] 계통연계용 변압기의 결상사고 특성

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 결상사고용 보호장치의 모델링

3.1 연계용변압기의 결상사고 모델링

태양광전원이 연계된 배전계통에서 연계용변압기의 결선 방법 및 철심 구조별로 결상사고 특성을 분석하기 위하여, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하면 그림 2와 같다. 여기서, 배전선로의 A상이 단선되는 결상상태를 차단기(CB, circuit breaker)로 모의하고, 연계용변압기 1차측 배전선로에는 3상부하가 연결된 것으로 나타난다. 또한, 연계용변압기는 PSCAD/EMTDC의 라이브러리에서 제공하는 UMEC(unified magnetic equivalent circuit) 모델을 사용한다[1]. 이 모델에서는 3상 2권선 변압기로 결선방법을 Y-Y, Y-Δ 형태로 변경하여 해석할 수 있으며, 철심구조를 3각 철심, 5각 철심, 단상 변압기의 형태로 변경하여 해석할 수 있다.



[그림 2] 연계용변압기의 결상사고 모델링

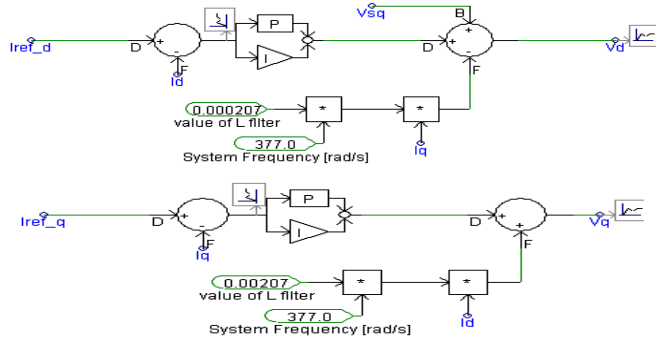
3.2 태양광전원 모델링

태양광전원의 계통연계용 인버터에 대하여 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 제어하기 위해, PI제어기를 이용한 세부적인 전류제어 알고리즘은 식 (1)과 식 (2)와 같고, 이 제어기를 모델링하면 그림 3과 같다. 여기서, 인버터의 전류 제어부는 유효전력과 디커플링 회로이기 때문에 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.

$$V_d = (I_{ref-d} - I_d) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) - I_q \cdot \omega L + V_{sq} \quad (1)$$

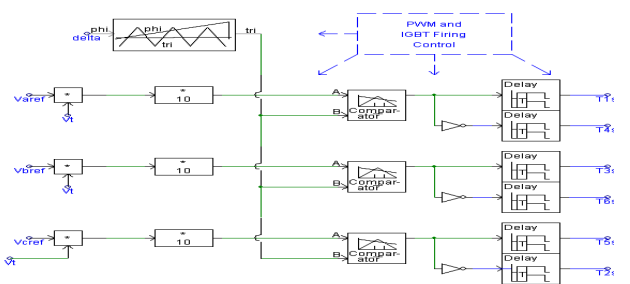
$$V_q = (I_{ref-q} - I_q) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) - I_d \cdot \omega L \quad (2)$$

여기서, V_d, V_q : 인버터 출력을 위한 d-q축 전압, I_{ref-dq} : 인버터 출력의 기준전류, I_d, I_q : d-q동기좌표계에 의한 계통전류(직류), V_{sq} : 계통의 순시전압



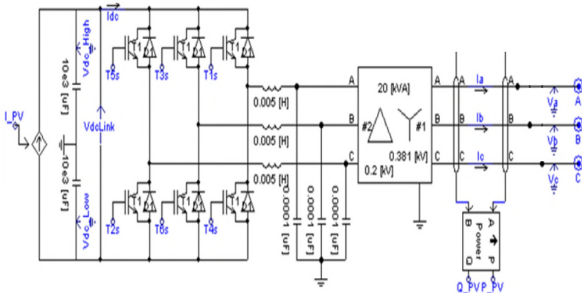
[그림 3] 태양광전원 시스템의 전류제어 모델링

상기의 식 (1), (2)에서 구한 V_d 와 V_q 는 d-q 좌표변환을 통해 3상의 전압으로 변환되며, IGBT를 구동시키기 위한 6개의 신호로 사용되는 PWM을 모델링하면, 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

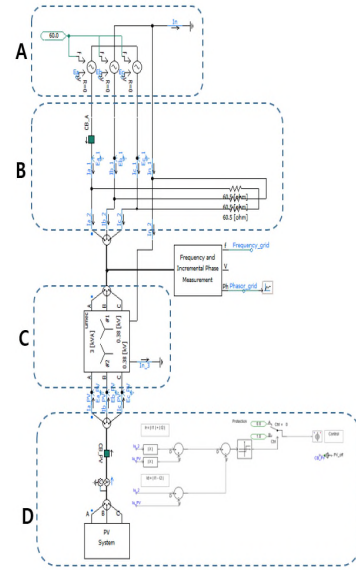


[그림 4] 태양광전원 시스템의 PWM 제어 모델링

한편, 상기의 제어를 수행하는 계통연계용 인버터를 모델링하면 그림 5와 같고, PWM으로부터 나온 6개의 스위칭 신호에 의하여 태양광전원에서 생성된 DC 출력을 120°의 위상차를 갖는 3상의 AC출력으로 변환시킨다.



[그림 5] 계통연계용 인버터 모델링



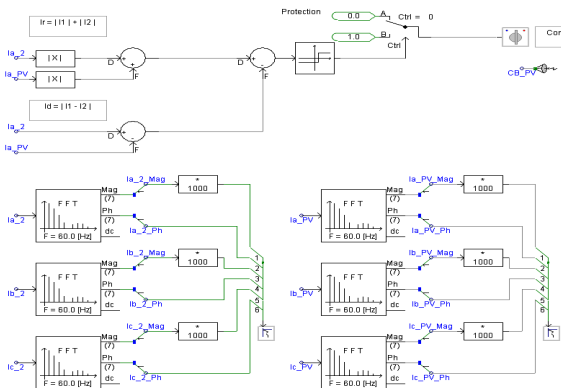
[그림 7] 전체계통 모델링

3.3 결상사고 보호장치 모델링

결상사고 시, 결상된 상에 전력이 공급되는 문제점을 방지하기 위해 이를 감지할 수 있는 결상사고 보호장치의 세부적인 동작 알고리즘은 식 (3)과 같고, 식 (3)에서 연계용변압기 1차측 및 2차측 전류의 크기와 위상을 이용해 계산되는 비율이 일정값 이상이면 결상사고로 인지하고 신호를 차단기와 인버터에 전달할 수 있으며, 이 보호장치를 모델링하면 그림 6과 같다.

$$ratio = \frac{|I_1 - I_2|}{|I_1| + |I_2|} \times 100 [\%] \quad (3)$$

여기서, I_1 : 변압기 1차측 전류, I_2 : 변압기 2차측 전류



[그림 6] 결상사고 보호장치 모델링

3.4 전체계통 모델링

상기의 내용을 바탕으로 태양광전원이 연계된 전체 배전계통을 모델링하면 그림 7과 같다. 여기서, 그림 7의 A부분은 배전용 변전소, B부분은 고압 배전선로 및 수용가부하, C부분은 태양광전원의 연계용변압기 그리고 D부분은 태양광전원 및 인버터와 결상사고 보호장치를 나타낸 것이다.

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

4.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제안한 태양광전원이 연계된 배전계통에서 연계용변압기의 결선방법 및 철심 구조별로 결상사고 특성을 분석하기 위하여, 각 구성요소의 시험 조건은 표 1과 같이 상정한다. 표 1에서 3각 철심 및 5각 철심 변압기는 3상 3kVA를 사용하고, 단상변압기는 1kVA 3대로 3상 결선하여 사용한다. 구체적으로 결상사고는 A상이 단선된 경우로 상정하며, 3상 부하는 연계용변압기 1차측 배전선로에 각상과 중성선에 접속하여 시험을 수행한다.

[표 1] 결상사고 시뮬레이션 조건

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

또한 결상사고 보호장치는 변압기 1, 2차 전류 및 위상을 확인하여 식 (3)으로 계산된 비율이 30[%] 이상일 경우 결상사고로 인지하고 동작하도록 설정하여 시험을 수행한다.

4.2 결상사고 보호장치 특성 분석

(1) Y-Y 결선 변압기의 결상사고 보호장치 특성 분석

연계용변압기 결선방법이 Y-Y 결선인 경우, 변압기의 1차측 A상이 단선되는 결상사고 보호장치 특성을 나타내면 표 2와 같다. 여기서, 표 2의 (a)는 전압 유효 특성을 나타내고 있으며, 변압기가 5각 철심과 단상변압기의 경우, TR 1, 2차측 모두 0[V]로 전압이 유효되지 않아 전압 측정으로 결상사고

검출이 가능함을 알 수 있으나, 3각 철심인 경우에는 결상된 A상 TR 1, 2차측 모두 219~220[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 3.6∠-3°[A]의 전류를 공급하며, 제안한 결상사고 보호장치의 설정값인 30[%]를 초과하여 결상검출이 가능함을 알 수 있었다. 즉 Y-Y 결선의 5각 철심 변압기는 전압측정으로 결상사고 보호가 가능하나, 3각 철심 변압기는 전압측정으로 결상사고를 검출할 수 없으며, 제안한 결상사고 보호장치를 이용하여 결상사고를 검출하여야함을 알 수 있었다.

[표 2] Y-Y 결선 변압기의 결상사고 보호장치 특성
(a) 전압 유기 특성

구분	3각 철심			5각 철심 / 단상변압기		
	A-N	B-N	C-N	a-n	b-n	c-n
TR1차 [V]	219	220	220	0	220	220
TR2차[V]	220	218	221	0	220	220

(b) 보호장치 동작 특성

구분	3각 철심			5각 철심 / 단상변압기		
	A상	B상	C상	A상	B상	C상
TR1차 [A]	3.6∠-3°	1.96∠-67°	1.54∠60°	0	0	0
TR2차 [A]	1.82∠6°	1.76∠-126°	1.97∠120°	0	0	0
$ I_1+I_2 $	5.42	3.72	3.51	-	-	-
$ I_1-I_2 $	5.4	3.25	3.03	-	-	-
비율	99.6	87.3	86.3	-	-	-
동작유무	동작	동작	동작	-	-	-

(2) Y-Δ 결선 변압기의 결상사고 보호장치 특성 분석

연계용변압기 결선방법이 Y-Δ 결선인 경우, 결상 사고 특성 및 보호장치 동작을 나타내면 표 3과 같다. 여기서, 표 3의 (a)는 전압 유기 특성을 나타내고 있으며, 변압기 철심구조와 상관없이 결상된 A상에 TR 1, 2차측 모두 216~219[V] 전압이 유기되어 전압측정으로 결상사고를 검출할 수 없음을 알 수 있었다. 또한, 표 2의 (b)는 보호장치 동작 특성을 나타내고 있으며, 변압기가 3각 철심인 경우에는 결상된 A상에 3.6∠-3°[A]의 전류를 공급하며, 3각 철심인 경우에는 3.61∠-3°[A]의 전류를 공급하고 있어, 제안한 결상사고 보호장치의 설정값인 30[%]를 초과하여 결상검출이 가능함을 알 수 있었다. 즉 Y-Δ 결선일 경우 철심구조와 상관없이 전압측정으로 결상사고를 검출할 수 없으며, 제안한 결상사고 보호장치를 이용하여 결상사고를 검출하여야함을 알 수 있었다.

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

구분	3각 철심			5각 철심 / 단상변압기		
	A-N	B-N	C-N	a-n/a-b	b-n/b-c	c-n/c-a
TR1차 [V]	219	220	220	218	220	220
TR2차[V]	217	222	219	216	222	219

(b) 보호장치 동작 특성

구분	3각 철심			5각 철심 / 단상변압기		
	A상	B상	C상	A상	B상	C상
TR1차 [A]	3.63∠-3°	1.89∠-62°	1.72∠59°	3.61∠-3°	2.02∠-65°	1.6∠56°
TR2차 [A]	3.14∠-30°	3.15∠-150°	3.13∠90°	3.1∠-30°	3.19∠-150°	3.16∠90°
$ I_1+I_2 $	5.44	3.71	3.53	5.4	3.86	3.42
$ I_1-I_2 $	1.82	1.80	1.79	1.83	1.79	1.82
비율	33.5	48.5	50.7	33.8	46.3	53.3
동작유무	동작	동작	동작	동작	동작	동작

5. 결 론

본 논문에서는 태양광전원이 설치된 배전선로의 단선 등으로 결상사고가 발생할 경우, 결상사고 특성을 분석하고 결상사고 검출방안을 제시하기 위하여, PSCAD/EMTDC를 이용하여 태양광전원, 인버터, 연계용변압기, 수용가부하로 구성된 배전계통과 결상사고 보호장치 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 분석한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 태양광전원이 연계된 배전계통에서 결상사고가 발생하면, 연계용변압기가 5각 철심 및 단상변압기 타입의 Y-Y결선만 태양광인버터가 결상을 감지하고, 정지하여 전압 및 전류를 공급하지 않음을 알 수 있었다.
- (2) 결상사고 발생 시 전기적인 특성 및 인버터 단독운전 방지 차원으로 평가하면, 태양광전원 연계용변압기는 Y-Y결선방식의 5각 철심구조가 결상사고 운용에 가장 효율적임을 알 수 있었다.
- (3) 제안한 결상사고 보호장치가 결상사고 검출에 유용함을 확인할 수 있었으며, 향후에는 보호장치의 안정성 및 오동작 가능성 등에 관한 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2020년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임. [S2854105]

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.
- [3] 강갑석, 이후동, 태동현, 노대석, “PSCAD/ EMTDC 의한 태양광전원 연계용변압기의 결상사고 특성 분석” 대한전기학회논문지, 제69권 제2호, pp. 225-234, 2020년.