

태양광전원 연계계통의 결상사고 운용방안에 대한 연구

강갑석*, 노대석**

*한국폴리텍대학, **한국기술교육대학교

e-mail:seok0826@kopo.ac.kr

A Study on Operation Method of Open Phase Fault in Distribution with PV System

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

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

요약

최근 정부는 에너지 고갈과 기후변화 문제로 인하여 2040년 까지 태양광전원 등 신재생에너지 비율을 30~35%까지 확대하는 정책을 추진하고 있다. 그러나 태양광전원이 연계된 배전선로의 단선 등으로 결상사고가 발생할 경우, 연계용 변압기의 결선방법 및 철심 형태에 따라 여러 가지 문제점이 발생할 수 있다. 즉, 인버터의 단독운전 방지기능이 작동하지 않아 결상된 상에 전원을 공급하여 계통에 악영향을 주는 사례 등이 보고되고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 현상을 해석하여 합리적인 운용방법을 제시하고자 PSCAD/EMTDC를 이용하여 태양광전원, 인버터, 연계용변압기, 수용가부하로 구성된 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 시험장치를 구현하여 결상사고 특성시험을 수행한다. 상기의 모델링 및 실증시험을 통해, 결상사고 발생에 따른 전기적인 특성을 분석한 결과, 결상사고해석 및 결상사고 운용방안에 유용함을 확인하였다.

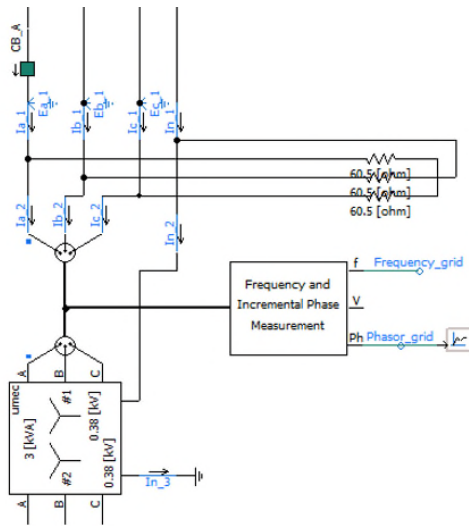
1. 서론

최근 정부는 에너지 고갈과 기후변화 문제로 인하여 2040년 까지 태양광전원 등 신재생에너지 비율을 30~35%까지 확대하는 정책을 적극적으로 추진하고 있다. 그러나 태양광전원이 연계된 배전선로의 단선 등으로 결상사고가 발생하였을 경우, 연계용변압기의 결선방법 및 철심 형태에 따라 여러 가지 문제점이 발생할 수 있다. 즉, 결상사고가 발생하였을 경우 인버터의 단독운전 방지기능이 작동하지 않아 결상된 상에 전원을 공급하여 계통에 악영향을 주는 사례 등이 보고되고 있다. 이러한 현상은 연계용변압기의 결선방법 및 철심 형태에 따라 다르게 나타나고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 현상을 해석하여 합리적인 운용방법을 제시하고자 PSCAD/EMTDC를 이용하여 태양광전원, 인버터, 연계용변압기, 수용가부하로 구성된 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 태양광전원 연계계통의 결상사고 시험장치를 구현한다. 상기의 모델링 및 시험장치를 바탕으로 결상사고 발생에 따른 전기적인 특성을 분석한 결과 결상사고해석 및 결상사고 운용방안에 유용함을 확인하였다.

2. PSCAD/EMTDC를 이용한 태양광전원 연계계통의 결상사고 특성 모델링

2.1 연계용변압기의 결상사고 모델링

태양광전원이 연계된 배전계통에서 연계용변압기의 결선방법 및 철심 구조별로 결상사고 특성을 분석하기 위하여, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하면 그림 1과 같다. 여기서, 배전선로의 A상이 단선되는 결상상태를 차단기(CB, circuit breaker)로 모의하고, 연계용변압기 1차측 배전선로에는 3상부하가 연결된 것으로 나타낸다. 또한, 연계용변압기는 PSCAD/EMTDC의 라이브러리에서 제공하는 UMEC(unified magnetic equivalentcircuit) 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 1] 연계용변압기의 결상사고 모델링

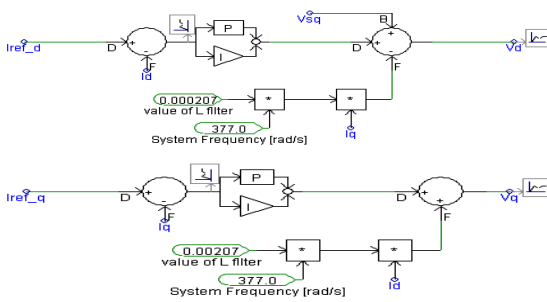
2.2 태양광전원 모델링

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

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

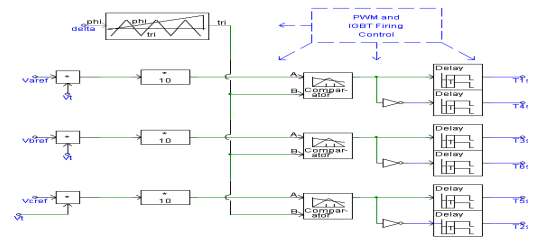
$$V_q = (I_{ref-q} - I_q) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) - I_d \cdot \omega L \quad (2)$$

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



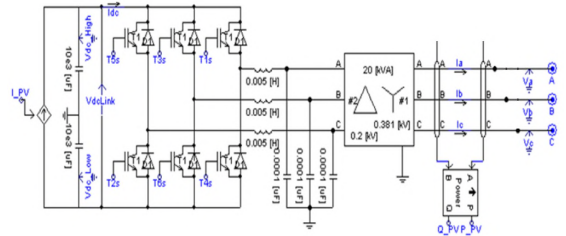
[그림 2] 태양광전원 시스템의 전류제어 모델링

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



[그림 3] 태양광전원 시스템의 PWM 제어 모델링

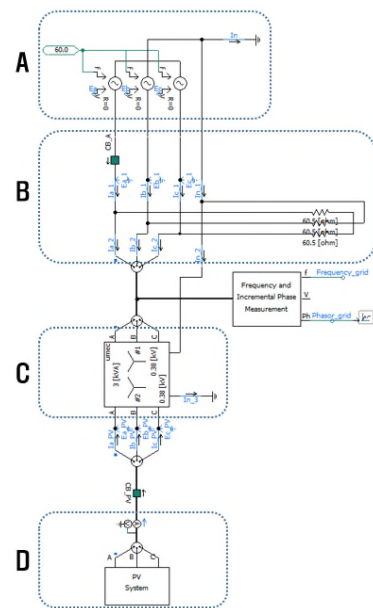
한편, 상기의 제어를 수행하는 계통연계용 인버터를 모델링하면 그림 4와 같고, PWM으로부터 나온 6개의 스위칭 신호에 의하여 태양광전원에서 생성된 DC 출력을 120°의 위상차를 갖는 3상의 AC출력으로 변환시킨다.



[그림 4] 계통연계용 인버터 모델링

2.3 전체계통 모델링

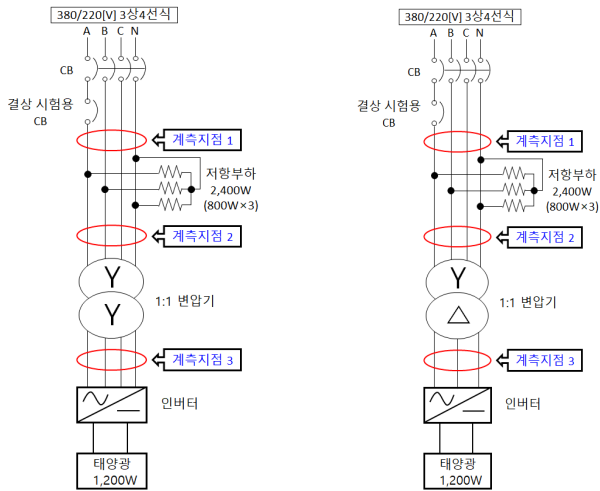
상기의 내용을 바탕으로 태양광전원이 연계된 전체 배전계통을 모델링하면 그림 5와 같다. 여기서, 그림 5의 A부분은 배전용 변전소, B부분은 고압 배전선로 및 수용가부하, C부분은 태양광전원의 연계용변압기 그리고 D부분은 태양광전원 및 인버터를 나타낸 것이다.



[그림 5] 전체계통 모델링

3. 태양광전원 연계계통의 결상사고 특성 시험장치 구현

본 논문에서는 태양광전원이 연계된 배전계통에서 연계용변압기의 결선방법 및 철심구조별로 결상사고 특성을 분석하기 위하여, 그림 6과 같이 태양광전원, 인버터, 연계용변압기, 수용가부하로 구성된 실제계통을 축약하여 결상사고 해석용 시험장치를 구현한다. 이 그림에서와 같이, 시험장치는 3상4선식 380/220V 전원을 사용하며, 계통연계용변압기, 결상사고 시험용 CB, 그리고 저항부하로 구성된다. 그림 6의 (a)는 Y-Y결선 변압기의 결상사고 시험장치를 나타내며, 그림 6의 (b)는 Y-△결선 변압기의 결상사고 시험장치를 나타낸다. 여기서, 연계용변압기의 권수비는 1:1 이고, 변압기철심은 구조별로 결상사고 특성을 비교하기 위하여 3상 3각 철심 3[kVA]와 단상 변압기 1[kVA] 3대로 구성된 5각 철심 변압기 형태로 구성한다. 또한, 결상사고 시 전력조류의 특성을 확인하기 위하여, 변압기 1차측에 저항부하 2,400W(800W×3)를 연결한다. 그리고 전원품질분석계를 계측지점 1, 2, 3번에 연결하여 전압 및 전류, 전력 등을 측정한다.



(a) Y-Y결선 회로도 (b) Y-△결선 회로도
[그림 6] 결상사고 시험장치 회로도

4. 시뮬레이션 및 시험 결과 분석

4.1 시뮬레이션 및 시험 조건

본 논문에서 제안한 태양광전원이 연계된 배전계통에서 연계용변압기의 결선방법 및 철심 구조별로 결상사고 특성을 분석하기 위하여, 각 구성요소의 시험 파라미터와 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 단선 된 경우로 상정하며, 3상부하는 연계용변압기 1차측 배전선로에 각상과 중성선에 접속하여 시험을 수행한다. 단상변압기 3대를 1개의 Bank로 구성하면, 일반적으로 5각 철심과 동일한 전기적 특성을 가지고 있으므로, 태양광전원 시험장치에서는 5각 철심 변압기의 전기적인 특성을 단상변압기 3대로 구현한다.

[표 1] 결상사고 시험 파라미터

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

4.2 결상사고 특성 분석

(1) Y-Y 결선 변압기의 결상사고 특성 분석

태양광전원이 연계된 배전계통에서 연계용변압기 결선방법이 Y-Y 결선인 경우, 변압기의 1차측 A상이 단선되는 결상사고 특성을 나타내면 표 2와 같다. 여기서, 표 2의 (a)는 전압 특성을 나타내고 있으며, 변압기가 3각 철심인 경우에는 결상된 A상에 계측지점 1, 2, 3 모두 211~220[V] 전압이 유지되며, 5각 철심과 단상변압기의 경우, 계측지점 1, 2, 3 모두 0[V]로 전압이 유지되지 않음을 알 수 있었다. 또한, 표 2의 (b)는 전류 특성을 나타내고 있으며, 변압기가 3각 철심인 경우에는 계측지점 2와 같이 결상된 A상에 3.2~3.6[A]의 전류를 공급하고 N상에는 2.5~5.3[A]의 전류가 흐르고 있으나, 5각 철심과 단상변압기의 경우, 태양광 인버터가 정지되어 전류를 공급하지 않음을 알 수 있었다. 연계용변압기가 Y-Y결선인 경우 결상사고가 발생하면, 5각철심과 단상변압기는 태양광전원 인버터가 정지하여 전압 및 전류를 공급하지 않으나, 3각철심 변압기는 인버터에서 결상사고를 감지하지 못하고 단독 운전되어 결상된 상에 전압 및 전류를 공급하여 계통에 악영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

[표 2] Y-Y 결선 변압기의 결상사고 특성 (a) 전압 특성

구분	3각 철심		5각 철심 / 단상변압기		
	PSCAD	시험장치	PSCAD	시험장치	
계측지점 1, 2 전압 (TR 1차) [V]	A-N	219	211	0	0
	B-N	220	219	220	220
	C-N	220	221	220	221
계측지점 3 전압 (TR2차) [V]	a-n	220	216	0	0
	b-n	218	221	220	219
	c-n	221	221	220	221

(b) 전류 특성

구분		3각 철심		5각 철심 / 단상변압기	
		PSCAD	시험장치	PSCAD	시험장치
계측지점 1 전류 [A]	A	0	0	0	0
	B	3.0	2.4	3.6	3.4
	C	3.1	3.2	3.6	3.7
	N	5.3	3.7	3.6	3.5
계측지점 2 전류 [A]	A	3.6	3.2	0	0
	B	1.9	1.6	0	0
	C	1.6	0.6	0	0
	N	5.3	2.5	0	0
계측지점 3 전류 [A]	a	2.0	2.9	0	0
	b	1.8	1.3	0	0
	c	1.8	0.6	0	0
	n	1.0	2.5	0	0

(2) Y-△ 결선 변압기의 결상사고 특성 분석

연계용변압기 결선방법이 Y-△ 결선인 경우, 결상 사고 특성을 나타내면 표 3과 같다. 여기서, 표 3의 (a)는 전압 특성을 나타내고 있으며, 변압기가 3각 철심인 경우에는 결상된 A상에 계측지점 1, 2, 3 모두 216~219[V] 전압이 유지되며, 5각 철심과 단상변압기의 경우, 계측지점1, 2, 3 모두 211~219[V] 전압이 유지됨을 알 수 있었다. 또한, 표 3의 (b)는 전류 특성을 나타내고 있으며, 변압기가 3각 철심인 경우에는 계측지점 2와 같이 결상된 A상에 3.2~3.6[A]의 전류를 공급하고 N상에 5.1~5.5[A] 전류가 흐르고 있으며, 5각 철심과 단상변압기도 3각철심과 동일하게 결상된 상에 3.2~3.6[A]의 전류를 공급하고, N상에 3.2~5.3[A]의 전류가 흐름을 알 수 있었다. 연계용변압기가 Y-△ 결선인 경우는 철심 형태와 관계없이 결상사고 발생 시 인버터는 결상사고를 감지하지 못하고 정상 운전되며, 결상된 상에 전압 및 전류를 공급하여 계통에 악영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

[표 3] Y-△ 결선 변압기의 결상사고 특성
(a) 전압 특성

구분		3각 철심		5각 철심 / 단상변압기	
		PSCAD	시험장치	PSCAD	시험장치
계측지점 1, 2전압 (TR 1차) [V]	A-N	219	206	218	211
	B-N	220	218	220	218
	C-N	220	221	220	220
계측지점 3 전압 (TR2차) [V]	a-b	217	215	216	216
	b-c	222	223	222	221
	c-a	219	216	219	217

(b) 전류특성

구분		3각 철심		5각 철심 / 단상변압기	
		PSCAD	시험장치	PSCAD	시험장치
계측지점 1 전류 [A]	A	0	0	0	0
	B	3.1	3.4	2.9	2.9
	C	3.2	4.4	3.3	3.7
	N	5.5	6.3	5.3	4.5
계측지점 2 전류 [A]	A	3.6	3.2	3.6	3.2
	B	2.0	2.2	2.0	1.9
	C	1.7	0.8	1.5	0.8
계측지점 3 전류 [A]	N	5.5	5.1	5.3	3.2
	a	1.8	3.0	1.8	3.2
	b	1.8	2.2	1.9	1.4
	c	1.8	2.7	1.8	3.3

5. 결 론

본 논문에서는 태양광전원이 연계된 배전계통에서 선로의 단선 등으로 결상사고가 발생하였을 경우, 인버터의 단독운전 방지기능이 작동하지 않아 결상된 상에 전원을 공급하여 계통에 악영향을 주는 현상을 분석하여 합리적인 운용 방안을 제시하기 위하여, PSCAD/EMTDC를 이용하여 태양광전원, 인버터, 연계용변압기, 수용가부하로 구성된 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 태양광전원 연계계통의 결상사고 시험장치를 구현하였다. 상기의 모델링 및 시험장치를 바탕으로 분석한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 태양광전원이 연계된 배전계통에서 연계용변압기가 Y-Y결선인 경우 결상사고가 발생하면, 5각철심과 단상변압기는 태양광인버터가 정지하여 전압 및 전류를 공급하지 않으나, 3각철심 변압기는 인버터에서 결상사고를 감지하지 못하고 단독운전 되어 결상된 상에 전압 및 전류를 공급하여 계통에 악영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

(2) 태양광전원이 연계된 배전계통에서 연계용변압기가 Y-△결선인 경우 결상사고가 발생하면, 철심 형태와 관계없이 결상사고 발생 시 인버터는 결상사고를 감지하지 못하고 단독운전 되며, 결상된 상에 전압 및 전류를 공급하여 계통에 악영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

(3) 결상사고 발생 시 전기적인 특성 및 인버터 단독운전 방지 차원으로 평가하면, 태양광전원 연계용변압기는 Y-Y결선방식의 5각 철심구조가 결상사고 운용에 가장 효율적임을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] 장수형, “전력변환장치 기반 분산전원이 도입된 배전계통의 새로운 보호방식”, 충북대학교 학위논문, 2017년.
- [2] 신동열, 윤동현, 차한주, “비대칭 3상 선로에서 변압기 철심구조별 문제점 분석 및 방지 대책” 대한전기학회논문지, 제61권 제10호, pp.15369-1541, 2012년.
- [3] 신동열, 하복남, 정원욱, 차한주, “배전계통에서 변압기 결선에 의한 역 조류 현상에 관한 연구”, 조명설비학회논문지 제22권 제9호, pp. 111-119, 2008년.
- [4] 강갑석, 이후동, 태동현, 노대석, “PSCAD/EMTDC 의한 태양광전원 연계용변압기의 결상사고 특성 분석” 대한전기학회논문지, 제69권 제2호, pp. 225-234, 2020년.