

EMTDC를 이용한 분산전원 연계 사고해석

■ 김 재 언 / 충북대학교
 ■ 차 한 주 / 충남대학교

1. 개요

본 연구에서는 분산전원이 연계된 배전계통의 양방향 보호협조 알고리즘을 제시하기 위하여, EMTDC/PASCAD를 이용하여 양방향 보호협조시스템에 대한 모델링을 수행하였고, 모델 배전계통에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 배전계통(배전용변전소, 고압배전선로, 저압 배전선로, 부하 등)과 태양광발전을 모델링하였고, 이것을 바탕으로 사고 지점을 파라미터로 하여 배전용변전소의 직하지점, 중간지점, 말단지점에 대하여 시뮬레이션을 수행하였고, 사고 대상으로는 1선 지락과 3상 단락사고를 대상으로 하였다. 또한 분산전원 연계 변압기의 결선방식에 대해서는 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 Y직접-델타 결선방식과 Y직접-Y직접접지 결선, Y비접지-델타 결선 등에 대하여 사고전류 특성을 해석하였다.

2. 배전계통과 분산전원의 모델링

가. 배전계통 모델링

분산전원의 배전계통 연계특성 평가를 위한 대상 배전계통 모델은 기존의 한국전력 배전선로를 기준으로 하여, PSCAD/EMTDC로 모델링을 수행하였다. 배전계통 모델은 배전용변전소(주변압기)와 고압배전선로, 부하로 나누어 수행하였다.

(1) 배전용변전소 모델링

그림 1은 PSCAD/EMTDC로 배전용변전소를 모델링한 것이다. 154kV 배전계통 측의 정상 분 %임피던스(100MVA 용량기준)는 $0.32+j2.314$ ($0.76+j5.49\Omega$, $L = 5.49 \div 2\pi f = 0.0146$ H), 영상분 %임피던스는 $j17.3$ ($j41\Omega$, $L = 41 \div 2\pi f = 0.1088$ H), 154kV/22.9kV 45MVA 주변압기의 % 임피던스는 $j15$ (45MVA기준), 주변압기의 탭은 1차 측에 있는 것으로 하여 그 값은 0.98 로, Y-Y 직접접지방식으로 하였다. 역률보상용 전력용 콘덴서 뱅크의 용량은 13 MVA 정도 ($2\pi f \times 66.876 \mu F \times 22.9kV^2 = 13.2$ Mvar)로 하였다. 이들 관련 데이터는 기존의 한국전력의 송배전선로 운영데이터에 근거한 것이다.

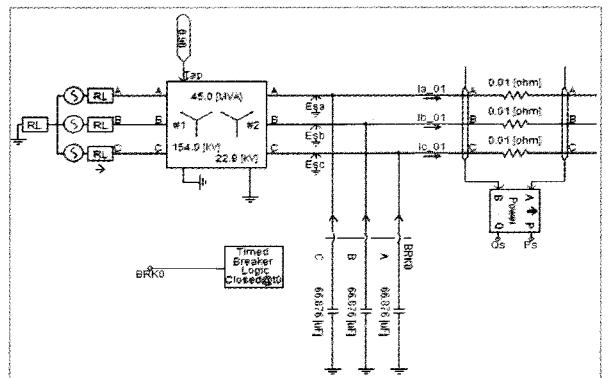
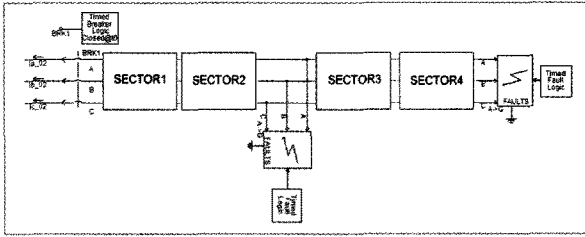
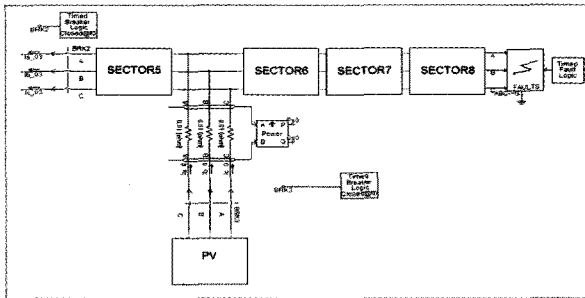


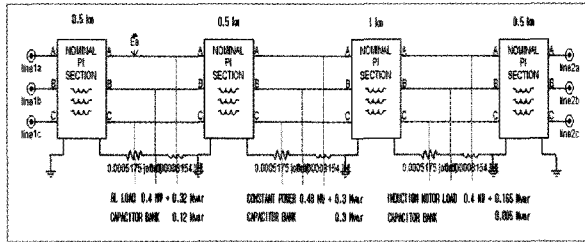
그림 1 배전용변전소의 모델링(계통전압 19610V ÷ √2 = 13221V=1.049 pu, 계통전류 400A ÷ √2=280A, 전력조류 10.86 MW+j3.63 Mvar, 역률 0.95)



(a) Feeder #1 배전선로 모델



(b) Feeder #2 배전선로 모델



(c) 각 구간(Sector)의 모델

그림 2 22.9 kV 배전선로 모델링

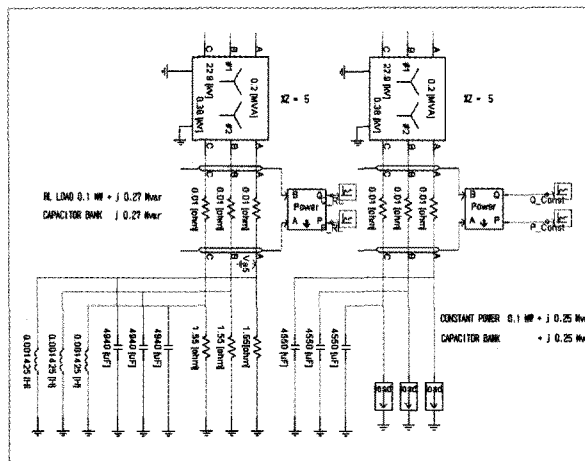


그림 3 태양광 발전설비 연계선로의 부하 모델링

(2) 고압 배전선로 모델링

배전용 변전소의 주변압기에는 일반적으로 4 내지 5개 정도의 22.9 kV 배전선로들이 각각 차단기를 통하여 연결되는 것이 보통이나 여기에서는 2개의 배전선로만을 그림 2와 같이 고려하기로 한다. 2개의 배전선로는 Feeder #1, Feeder #2 로 각각 명명하고, Feeder #2의 부하구간 Sector 5 직후에 태양광발전설비가 연계되는 것으로 한다. 각 배전선로는 4개의 부하 구간으로 나누어지는 것으로 하며, 배전선로는 현재의 국내 한전 배전선로에 근거하여 3상4선식 공통 중성선 다중접지방식으로 하며, 선종은 ACSR 160 mm로 하고, 이 선로의 단위 km당 정상분 %임피던스 (100 MVA 기준) $3.86 + j 7.42 (0.2024 + j 0.3891 \Omega / \text{km})$, 영상분 임피던스(중성선 ACSR 95 mm의 정상분 임피던스와 동일) $9.87 + j 22.68 (0.5175 + j 1.1894 \Omega / \text{km})$ 로 각각 선정 하였다.

각 배전선로의 구간(Sector)은 그림 2의 (c)와 같이 0.5km, 0.5km, 1km, 0.5 km의 파이등가회로 구성하여 총 2.5km로 하고, 처음 0.5km 직후에 정 임피던스 부하 $0.4 \text{ MW} + j 0.32 \text{ Mvar} (0.225 \Omega + j 2 \mu\text{F} 0.000475 \text{H per phase})$, 무효전력보상콘덴서 $j 0.12 \text{ Mvar} (2 \mu\text{F} \times 2150 \mu\text{F} \times 380 \text{V}^2 = 117 \text{ kVar})$, 다음 0.5km 직후에 정 전력 부하 $0.48 \text{ MW} + j 0.3 \text{ Mvar}$, 무효전력보상콘덴서 $j 0.3 \text{ Mvar} (2 \mu\text{F} \times 5200 \mu\text{F} \times 380 \text{V}^2 = 283 \text{ kVar})$, 다음 1km 직후에 유도모터부하 $0.4 \text{ MW} + j 0.165 \text{ Mvar}$, 무효전력보상콘덴서 $j 0.005 \text{ Mvar} (2 \mu\text{F} \times 100 \mu\text{F} \times 380 \text{V}^2 = 5.4 \text{ kVar})$ 가 각각 연결되어 있는 것으로 모델링하였다.

(3) 배전계통 부하 모델링

태양광 발전설비가 연계되어 있는 선로의 부하는 그림 3과 같이 22.9kV/380V 200kVA 5%의 Y-Y 직접 접지방식의 변압기를 통하여 연결되어 있도록 하고, 정 임피던스 부하 $0.1 \text{ MW} + j 0.27 \text{ Mvar} (1.55 \Omega, j 2 \mu\text{F} 1.425 \text{mH per phase})$, 무효전력보상콘덴서 $j 0.27 \text{ Mvar} (2 \mu\text{F} \times 4940 \mu\text{F} \times 380 \text{V}^2 = 269 \text{ kVar})$, 정 전력 부하 $0.1 \text{ MW} + j 0.25 \text{ Mvar}$, 무효전력보상콘덴서 j

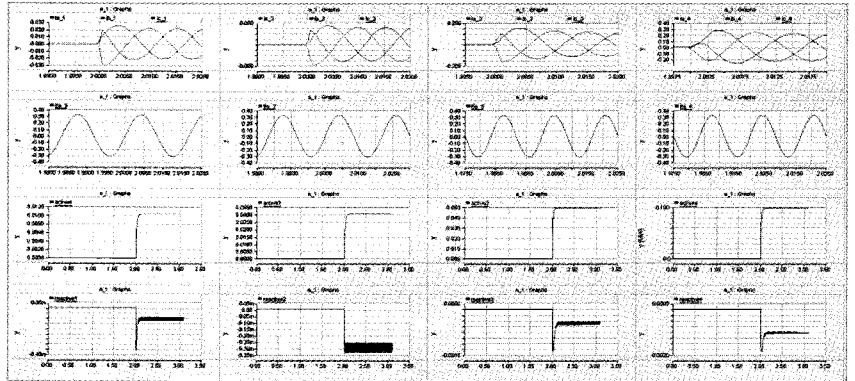
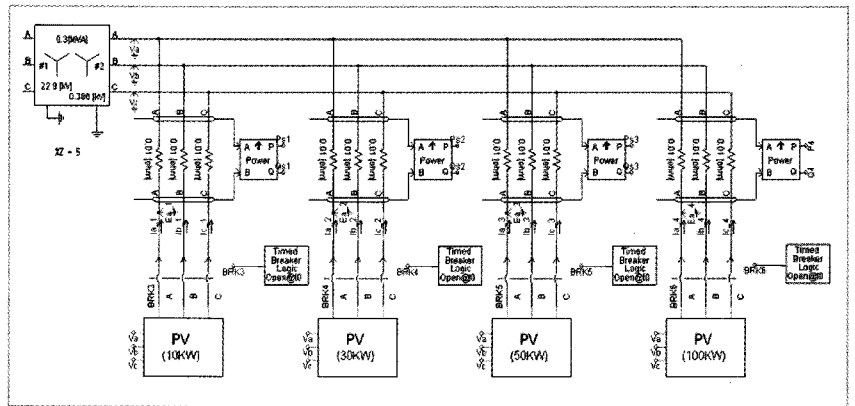
0.25 Mvar ($2\pi \times 4550 \mu\text{F} \times 380\text{V}^2 = 248 \text{ kVar}$)로 구성하였다. 이와 같이 구성된 모델 부하 측의 2차측 380V측의 전압은 $0.32 \div \sqrt{2} \times \sqrt{3} = 392\text{V}$ 로, 정 임피던스 부하 측 전력 조류 $0.1 \text{ MW} + j0$, 정 전력부하 측 전력조류 $0.1 \text{ MW} + j0$ 로 각각 시뮬레이션 되었다.

나. 태양광발전의 모델링

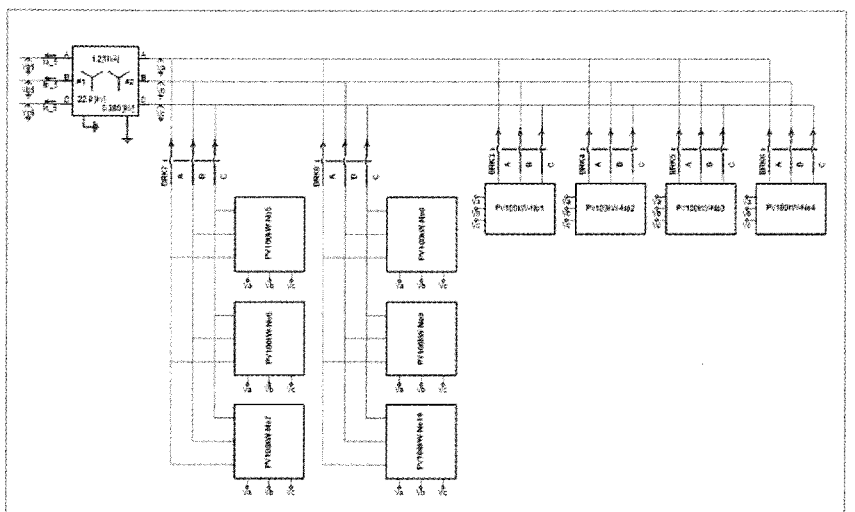
태양광 발전설비의 모델은 주류를 이루고 있는 10 kW, 30 kW, 50 kW, 100 kW 를 기준으로 하여 모델을 설정하였는데, 여기서는 그림 4와 같이, 300 kVA 22.9kV/380V 5% 임피던스 변압기를 통하여 연계되는 3상 4선식 380V 저압선로 연계용 190 kW급 PV발전시스템모델과 1200 kVA 22.9kV/380V 5% 임피던스 변압기를 통하여 연계되는 1MW급 PV발전시스템의 2종류를 모델링하였다. 또한, 그림 5는 100kW급 태양광발전설비의 제어기 모델을 나타낸 것이다.

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

여기서는 상기의 모델 배전계통에 대하여, 1선 지락 및 3상 단락 사고에 대한 사고전류 특성을 분석하였다. 사고

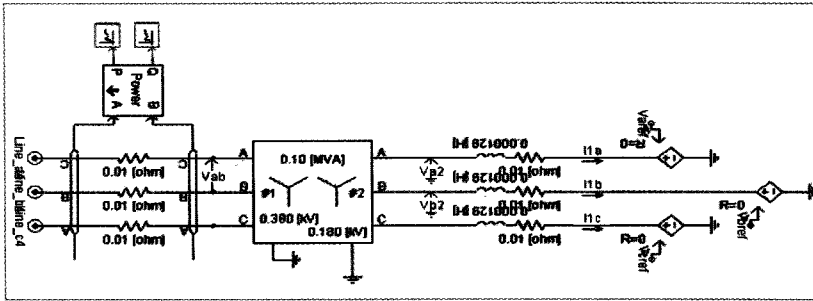


(a) 3상4선식 380V 저압선로 연계용 190 kW급 태양광발전 모델링

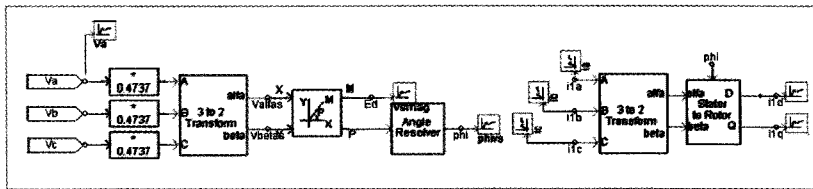


(b) 1MW급 태양광발전 모델링

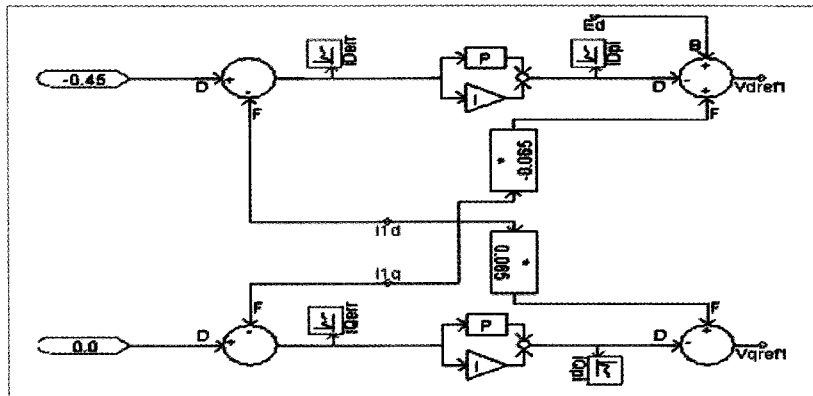
그림 4 태양광 발전설비 연계 모델링



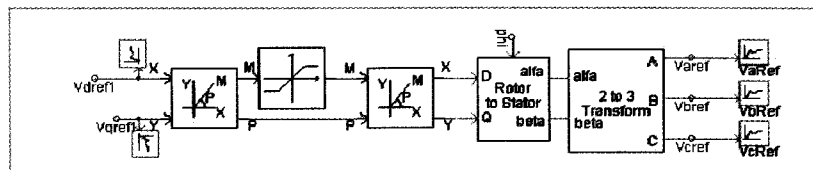
(a) PV 시스템 연계계통 단선도



(b) 전압 및 전류의 dq 변환



(c) 전류제어 블록도



(d) 전압신호의 dq - abc 변환

그림 5 100kW급 태양광발전의 제어기 모델링

지 결선, Y직접-델타 결선, Y비 접지-델타 결선 등에 대하여 사고전류 특성을 해석하였다.

가. 1선 지락 사고전류 특성 분석

(1) 시뮬레이션 절차

모델계통에 대하여 선로말단, 중간, 변전소직하의 3가지 장소에서의 1선지락사고시(사고저항 0.1Ω) 사고전류분석을 위한 시뮬레이션 수순을 다음과 같이 정하였다.

Step 1. t=0초에서 모델계통에 전원을 가압한다.

Step 2. 모델계통이 정상상태에 도달한 t=2초 이후 상태를 확인한다.

Step 3. t=2.1초에서 Feeder #2 말단(Sector 8), 중간(Sector 6), 직하에서 a상 1선 지락사고를 0.2초 동안 일으킨다.

Step 4. Feeder #2 인출단의 차단기 Breaker 2가 Feeder #2 말단 a상 1선 지락사고를 감지하여 0.1초내(t=2.2초) 고장전류를 차단하고, 0.5초 후(t=2.7초)에서 재폐로한다.

(2) 시뮬레이션 결과

그림 6은 전술의 수순에 의거하여 선로말단, 중간, 직하에 사고를 시뮬레이션한 결과를 나타낸 것이다. 또한, 표 1은 연계

지점으로는 직하와 중간, 말단지점을 선정하였고, 분산전원 연계 변압기의 결선방식으로는 Y직접-Y직접

용 변압기의 결선방식에 따라 사고 특성을 분석한 것이다.

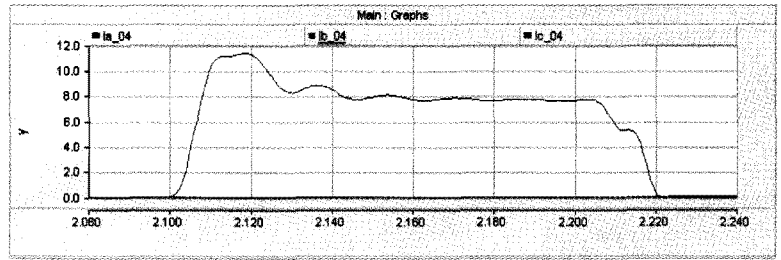
(3) 시뮬레이션 분석

○ 분산전원 연계용 변압기의 결선방식에 따라 분산전원(태양광발전) 연계 전후의 고장전류의 전체 값은 크게 변화가 없음을 알 수 있었다. 가장 일반적인 형태인 Y직접접지- Δ 결선과 Y직접-Y직접접지 결선, Y비접지- Δ 결선, Δ -Y직접접지 결선의 4가지 방식에 대하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 변전소 말단사고 시 1선 지락 사고전류는 2,263A - 2,307A 으로 분산전원 연계 전의 2,263A와 거의 동일한 수준이었다.

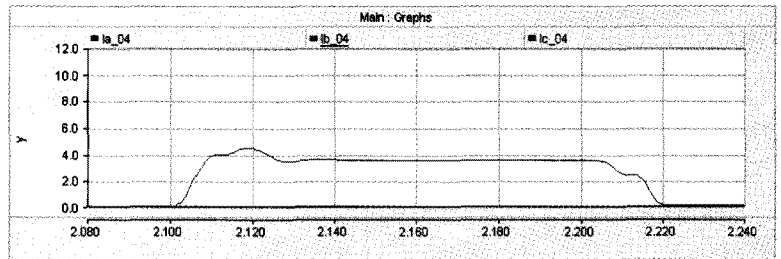
○ 분산전원의 연계용 변압기의 결선방식에 따라 분산전원(태양광발전) 연계 전후의 계통 측(배전용 변전소)의 사고전류 공급 값은 달라진다. 예를 들어, 변전소 직하지점에 지락사고가 발생한 경우, 분산전원의 연계용 변압기의 가장 일반적인 형태인 Y직접접지- Δ 결선방식에 대하여, 계통 측 공급고장 전류 값(약 7,612A)이 다른 방식(Y직접-Y직

접접지 결선 : 7,803A, 비 연계 : 7,713A)보다 약 3% 정도 작은 값으로 나타났다. 이것은 고장전류의 분류효과가 Y직접접지- Δ 결선방식에서 크게 나타난다는 것을 의미한다. 따라서 분산전원의 연계용 변압기의 결선방식에 따라 OCGR의 정정치를 산정해야 한다.

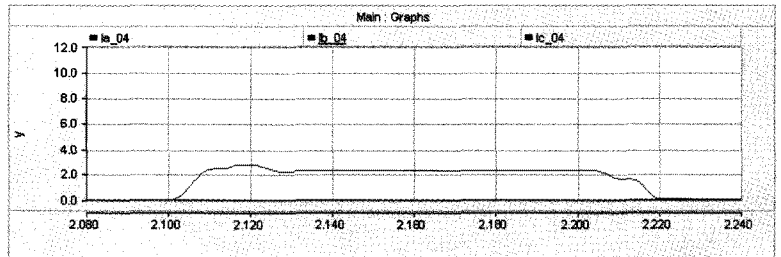
○ 분산전원의 연계용 변압기의 결선방식에 따라 분산전원(태양광발전) 연계 전후의 분산전원 측(태양광발전 연계 점)의 사고전류 공급 값은 달라진다. 예를 들어, 변전소 직하 지점에 지락사고가 발생한 경우, 분산전원의 연계용 변압기의 가장 일반적인 형태인 Y직접접지- Δ 결선방식에 대하여, 분산전원 측 공급고장 전류 값(약 200A)이 다른 방식(Y직접-Y직접접지 결선 : 39.6A, Y비접지- Δ 결선 : 17A)보다 약 5.1배와 11.8배



(a) 변전소 직하지점 1선 지락 고장전류



(b) 선로 중간지점 1선 지락 고장전류



(c) 선로 말단지점 1선 지락 고장전류

그림 6 1선 지락 시 고장전류 특성 해석

정도로 큰 값으로 나타났다.

○ 지락사고가 발생한 후, 변전소 차단기가 이를 검출하여 트립 된 후, 분산전원(태양광발전)이 고장전류 검출차단 동작이 늦어지는 경우, 분산전원(태양광발전)은 1선 지락 상태의 선로에 연계되어 단독 운전되고 있는 상태 하에 있게 되고, 이 때 고장공급전류는 Y-Y결선 및 Y- Δ 결선에 대하여 각각, 정격전류의 약 214%, 150% 정도로 된다.

○ 분산전원(PV)이 연계된 경우 1선 지락 사고의 경우가 계통에 미치는 영향 및 분산전원(PV)의 응답 특성이 문제가 된다는 것을 알 수 있다. 특히 주의해야 할 것은 분류효과에 따른 변전소인출구의 보호릴레이(리클로우

표 1 1선 지락사고 시 고장전류 분석

	분산전원 연계 전			연계용변압기 Y직접-Y비접지 선지 결선			연계용변압기 Y직접집지-Delta 결선			연계용변압기 Y비접지-Delta 결선			연계용변압기 Delta-Y비접지 결선		
	직하	중간	말단	직하	중간	말단	직하	중간	말단	직하	중간	말단	직하	중간	말단
고장전류 (L_04)	7713	3525	2263	7842	3551	2264	7798	3628	2307	7715	3527	2263	7715	3527	2263
계통 측 공급 고장전류 (L_03)	7713	3525	2263	7803	3534	2292	7612	3503	2253	7711	3539	2299	7711	3539	2299
PV측 공급 고장전류 (L_05)	-	-	-	39.6	35.6	31	200	159	101	17	20	23	17	20	23
사고분리 상태 PV측	-	-	-	정격 이하	43	47	정격 이하	정격 이하	정격 이하	30	31	33	30	31	33
공급전류 PV측 정격전류	-	-	-	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22

표 2 3상 단락사고 시 고장전류분석

	Without PV			1000kW PV		
	말단	중간	직하	말단	중간	직하
고장전류(L_04)	2260	3465	7694	2216	3448	7690
계통측 공급고장전류(L_03)	2306	3550	7763	2308	3527	7768
PV측 공급고장전류(L_05)	-	-	-	25	30	15.5
사고분리상태 PV측 공급전류	-	-	-	26	7.3	7.4
PV측 정격전류	-	-	-	22	22	22
PV측 기동전류	-	-	-	26	26	26

저)의 정정치 및 분리된 1선지락 사고 상태의 선로에 단
독운전 되고 있는 분산전원(태양광발전)에 대한 것이다.

나. 3상 단락시 사고전류 분석

(1) 시뮬레이션 절차

모델계통에 대하여 선로말단, 중
간, 변전소직하의 3가지 장소에서의
3상 단락사고시(사고저항 0.1Ω) 사
고전류분석을 위한 시뮬레이션 수순
을 다음과 같이 정하였다.

Step 1. t=0초에서 모델계통에 전
원을 가압한다.

Step 2. 모델계통이 정상상태에 도
달한 t=2초 이후 상태를 확인한다.

Step 3. t=2.1초에서 Feeder #2 말
단(Sector 8), 중간(Sector 6), 직하에
서 3상 단락사고를 0.2초 동안 일으
킨다.

Step 4. Feeder #2 인출단의 차단기 Breaker 2가
Feeder #2 말단 3상 단락사고를 감지하여 0.1초 내
(t=2.2초) 고장전류를 차단하고, 0.5초 후(t=2.7초)에서
재폐로한다.

(2) 시뮬레이션 결과

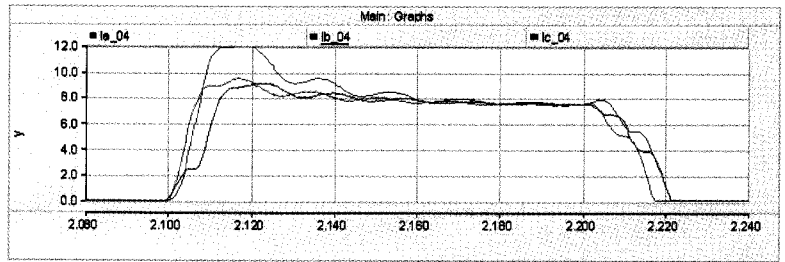
전술의 수순에 의거하여 선로 말단, 중간, 직하에 대한 시뮬레이션 결과는 그림7과 표 2와 같다.

(3) 시뮬레이션 분석

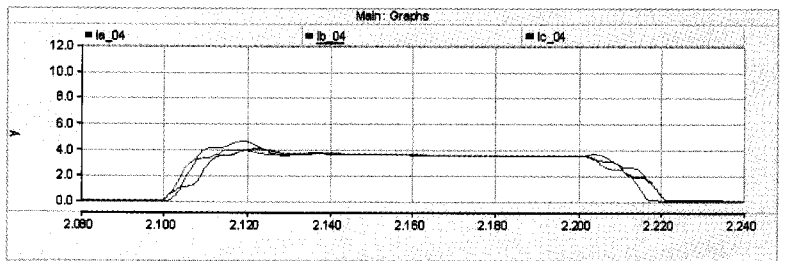
3상 단락사고의 경우는 Y-Y 직접접지방식 및 Delta-Y 직접접지방식에 있어서 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 그 이유는 3상 평형사고인 것에 있다. 특히 3상 단락사고의 경우는 분류효과도 거의 나타나지 않았으며, 분산전원(태양광발전)의 공급 고장전류도 거의 정격전류와 동일한 수준으로 나타났다.

4. 결론

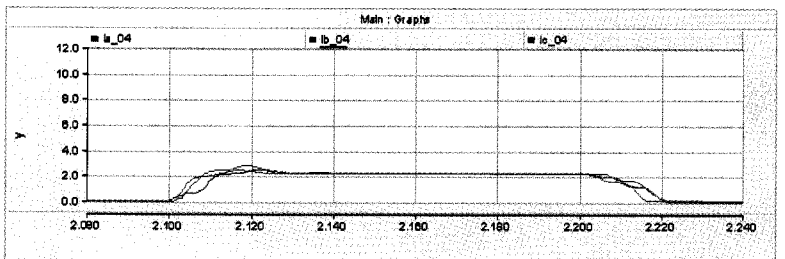
태양광발전 설비가 배전계통에 연계된 경우에 대하여 EMTDC/PASCAD를 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 1선 지락 사고의 경우가 배전계통에 미치는 영향 및 태양광의 응답 특성에 문제점이 발생할 가능성이 있음을 확인하였다. 특히 주의해야 할 것은 분류효과에 따른 변전소 인출구의 보호기기(리클로저)의 정정치 및 분리된 1선 지락 사고 상태의



(a) 배전용변전소 직하지점 3상 단락 고장전류



(b) 선로 중간지점 3상 단락 고장전류



(c) 선로말단지점 3상 단락 고장전류

그림 7 모델 배전계통의 3상 단락 시 고장전류 특성

선로에 단독운전되고 있는 태양광발전 설비에 대한 것으로 이에 대한 양방향 보호협조 알고리즘이 요구됨을 알 수 있었다.