

## 연계형 태양광발전설비의 새로운 오동작 방지 및 재병입 알고리즘 제안

(Algorithm for Preventing Malfunction and Reclosing in Grid-Connected PV Systems)

황민수\* · 전태현\*\*

(Minsoo Hwang · Taehyun Jeon)

### Abstract

In general, the unidirectional power flow is normal in distribution feeders before activation of distributed power source such as PV. However, the interactive power flow is likely to occur in case of the power system under distributed generation. This interactive power flow can cause an unexpected effect on convectional protection coordination systems designed based only on the unidirectional power flow system. When the power line system encounters a problem, the interactive power flow can be a contributed current source and this makes the fault current bigger or smaller compared to the unidirectional case. The effect of interactive power flow is varied depending on the location of the point to ground fault, relative location of the PV, and connection method. Therefore it is important to analyse characteristics of fault current and interactive flow for various transformer connection and location of the PV. This paper proposes a method of improved protection coordination which can be adopted in the protective device for customers in distribution feeders interconnected with the PV. The proposed method is simulated and analysed using PSCAD/EMTDC under various conditions.

Key Words : Distributed Generation, Photovoltaic Power Generation, Bi-Directional Protective Coordination

### 1. 서 론

기후변화협약의 발효와 지능형전력망촉진법 제정, 지난 5월 2일 전기 다소비 산업체의 긴급 부하조정이 이루어지는 등 전력부족 상시화가 갈수록 심화되는 국

내 전력수급사정, 5월 5일 홋카이도 도마리 원전 3호기가 정지하면서 일본에서는 모든 원전이 가동을 중지해 원전제로 체계로 들어가는 등 전 세계적인 원전 기피 등 태양광발전을 포함한 신재생에너지의 중요성은 날로 증대되고 있으며, 특히 그림 1과 같이 2003년 이후 완만하게 증가하던 신재생에너지 발전량은 RPS (Renewable Portfolio Standard)의 법적 효력이 발생되는 2012년을 기점으로 폭발적인 증가가 예상되고 있는 바, 관련 연구 및 법령 정비가 시급한 실정이다[1].

태양광발전설비 등 분산전원이 활성화되기 전에 일

\* 주저자 : 서울과학기술대학교 산업대학원 전기공학과 석사과정

\*\* 교신저자 : 서울과학기술대학교 전기정보시스템공학과 교수

Tel : 02-970-6409, Fax : 02-978-2754

E-mail : thjeon@seoultech.ac.kr

접수일자 : 2012년 5월 22일

1차심사 : 2012년 5월 25일

심사완료 : 2012년 6월 20일

반적인 배전계통에서는 전력조류가 변전소에서 부하 말단으로 단방향이었으나 분산전원이 연계된 계통에서는 출력용량에 따라 양방향 조류가 발생할 수 있다.

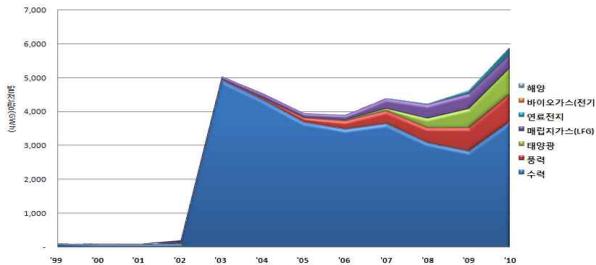


그림 1. 연도별 신재생에너지 발전량추이  
Fig. 1. Changes in annual renewable energy generation

이러한 양방향 조류는 단방향 조류만을 고려하여 설계 및 보호협조 체계를 구축한 배전선로에 오동작, 오부동작 등 많은 악영향을 미칠 수 있으며, 사고 발생 시 기여 전류원으로 작용하여 고장전류를 크게 또는 작게 할 수 있다. 특히 전기사업자인 한전 계통측의 보호협조체계 향상방안은 다양한 연구가 진행되고 있으나 수용가측 보호협조 체계에 대한 연구는 상대적으로 미미한 실정이다[2-4, 8-10].

이러한 양방향 조류 및 고장전류는 연계용 변압기 결선방식과 거리별 PV의 위치, 지락사고 지점에 따라 다른 특성을 나타내고 있다. 따라서 다양한 변압기 결선방식별 고장전류 및 거리별 PV 위치, 지락사고 위치에 따른 양방향 조류 및 고장전류가 계통에 미치는 영향을 검토할 필요가 있으며, 이를 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 결선방식별, PV 위치별, 지락사고 위치별 사고를 상정하여 계통에 미치는 영향을 분석하고 태양광발전설비가 연계된 배전계통에서 수용가측 보호기기의 향상된 보호협조 방안을 제안하고자 한다.

## 2. 태양광발전설비 보호설비 현황 및 오동작 사례

### 2.1 수용가측 보호설비 현황

수용가측 보호설비는 일반적으로 그림 2와 같이 수

변전설비 단선결선도 형태로 이루어져 있고 태양광발전설비의 고장이 발생했을 때 설비보호를 위해 지락과전류계전기(50/51G), 과전류계전기(50/51), 적정한 전압과 주파수를 유지하기 위해 과전압계전기(59), 과·저주파수계전기(81O, 81U) 및 방향성 유·무효전력계전기(32P, Q), 부족전압계전기(27) 등으로 구성되어 있다.

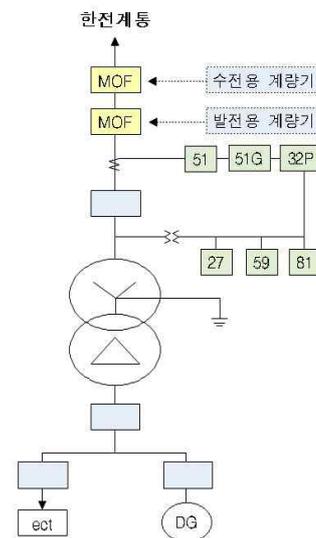


그림 2. 발전설비 구성도  
Fig. 2. Configuration of the generation facility

### 2.2 수용가측 보호계전기 오동작 사례

1,200[kW] 서천 태양광발전의 발전 수용가측 구내 통합보호계전기에 기록된 OCGR 오동작 내역은 표 1과 같으며, 2008년 1월 17일~3월 16일, 2개월 동안 지락고장 3건, 전선단선 4건, 불평형전류 8건 총 15건이 발전 수용가측 설비 고장과 무관하게 한전 계통측 고장으로 인해 수용가측 OCGR이 오동작하였다. 수용가측 OCGR의 설정치는 15[A]로 되어 있다.

사고원인은 1/17, 06:35 경 장항변전소 #3 MTR (45/60MVA, Y-Y-Δ), 한산D/L 29호 전주에서 피뢰기 파손으로 지락고장이 발생하였는데 서천 태양광발전설비의 연계용변압기 결선(Ygrounded-Δ)으로 인한, 역 조류로 동일 Bank의 인근선로에서 공급받는 서천 태양광 수용가측 OCGR이 오동작하였고 동시에 서면

D/L CB와 서면간 532호 R/C가 오동작 하였다. 또한 전원측 지락사고, 전선단선 사고, 불평형 부하에 의해 수용가측 OCGR이 오동작하였다.

표 1. 서천태양광 수용가측 OCGR 계전기 오작동 내역  
Table 1. Operating conflict of OCGR relay in Seo-Cheon generation customer

동작 시간	전 류[A]				비 고
	a상	b상	c상	n상	
1/17 06:35	45.0	44.9	44.69	135.9	한산D/L 지락고장
1/17 09:54	48.9	39.4	53.2	140.5	"
1/28 00:06	88.7	88.7	88.8	265.6	서면D/L 지락고장
3/07 09:01	17.3	19.1	0	31.6	전원측 C상 단선
3/07 09:09	18.8	20.6	0	34.0	"
3/07 09:57	17.4	19.0	0	31.6	"
3/07 10:44	14.7	14.8	0	26.0	"
3/07 22:08	9.0	8.3	8.5	26.5	불평형 전류
3/09 04:13	9.0	8.39	8.5	26.5	"
3/10 22:25	9.0	8.3	8.4	26.1	"
3/11 22:24	8.9	8.3	8.3	26.0	"
3/12 06:29	9.0	8.5	8.39	26.6	"
3/13 22:31	9.2	8.5	8.5	26.5	"
3/14 00:44	9.4	9.0	8.6	27.5	"
3/16 22:24	9.4	8.8	8.7	27.5	"

기타 상세 고장원인은 비교와 같으며 동 사고의 고장전류를 보면 A상 전류 45[A], B상 44.9[A], C상 44.69[A], N상 135.9[A]로 중성선 전류가 상전류의 약 3배정도로 측정되었다[3].

### 3. 원인분석을 위한 시뮬레이션

#### 3.1 연계용변압기 결선방식별 모델링

사고사례에 대한 원인분석을 위해 세가지 형태의 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 연계용 변압기 결선방식에 따라 고장전류가 다른 특성과 역조류에 의하여 보호계전기가 오동작하는 현상을 분석하기 위해 그림

3과 같이 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하였으며, 상단 D/L A상에 SLG(Single Line-to-Ground) fault 1을, 하단 D/L A상에 SLG fault 2를 각각 발생시켜 연계용변압기 결선이 각각 Y-Y, Y- $\Delta$ 일 때 연계용변압기 중성선에 흐르는 전류 크기 변화 및 인접된 피더에 미치는 영향 등 사고영향을 분석하였다[7].

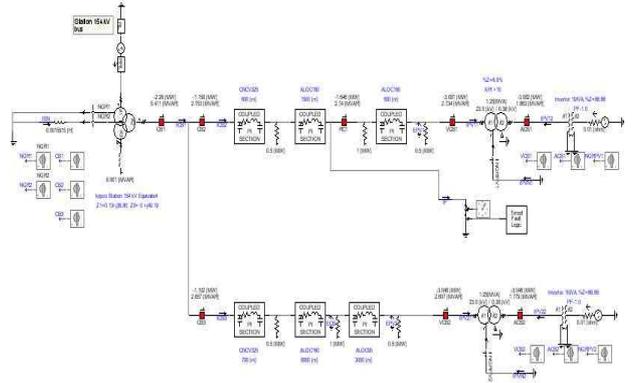
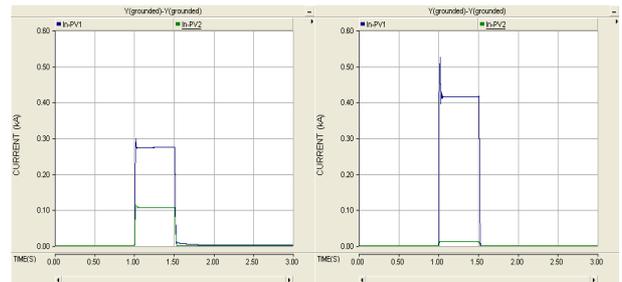
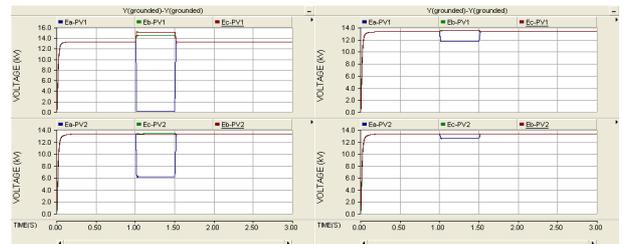


그림 3. 변압기 결선별 사고 해석을 위한 모의 계통 구성도  
Fig. 3. Simulated system block diagram for the analysis of accident by transformer connections

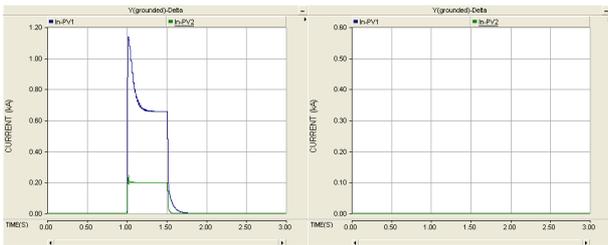


(a) fault 1, 2일 때 PV1, PV2 연계용변압기 중성선 전류

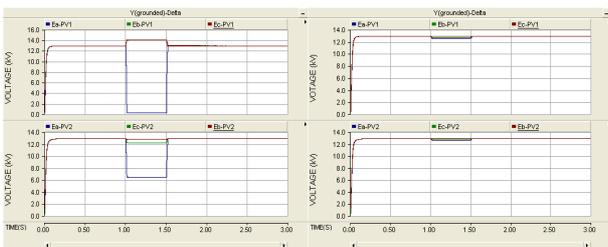


(b) fault 1, 2일 때 PV1, PV2 A,B,C상 전압

그림 4. Y-Y 결선 Simulation 결과  
Fig. 4. Simulation results of Y-Y connection



(a) fault 1, 2일 때 PV1, PV2 연계용변압기 중성선 전류



(b) fault 1, 2일 때 PV1, PV2 A,B,C상 전압

그림 5. Y-Δ 결선 Simulation 결과  
Fig. 5. Simulation results of Y-Δ connection

그림 4의 (a)와 그림 5의 (a)와 같이 SLG fault가 발생한 선로보다 인접되어 있는 선로의 중성점에 흐르는 전류가 상대적으로 작은 것으로 분석되었으며, Y-Y결선이 Y-Δ결선보다 평균 사고전류가 작고, B,C 건전상의 전위상승을 확인하였다.

### 3.2 PV 연계 위치별 시뮬레이션 및 분석

배전선로의 일반적 특징은 말단으로 갈수록 고장전류가 작아지게 되지만 태양광발전설비가 고정되어 있는 배전계통에 접속되는 경우에는 일반적인 특성과 다른 결과가 나올 수 있다. 따라서 그림 6과 같이 동일 배전선로에 각각 직하, 중간, 말단에 동일 용량의 태양광발전설비를 연계하고 동일한 지점(선로 중간)에 SLG fault가 발생시켰을 때 연계용변압기의 중성점에 유입되는 고장전류 등을 분석하였다.

시뮬레이션 결과 CB1, CB2에 흐르는 A, B, C상 전류 및 PV 단자전압 등에서는 특별한 변화가 없었으나 연계용변압기 중성점에 유입되는 고장전류는 일반적인 특징과는 다르게 말단, 중간이 약 0.7[kA]직하가 0.3[kA]로 나타났다. 이러한 결과는 일반적인 특성을

감안하여 보호협조를 구성한 계통에 보호계전기의 오동작 및 오부동작의 원인이 되고 있는 것으로 판단된다.

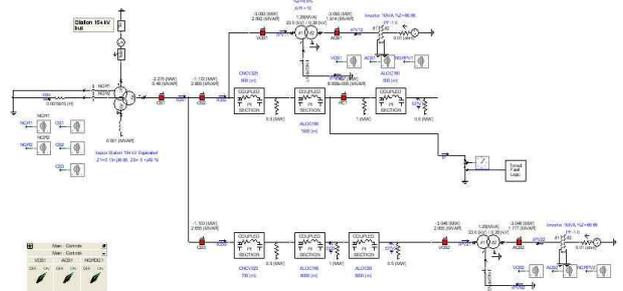
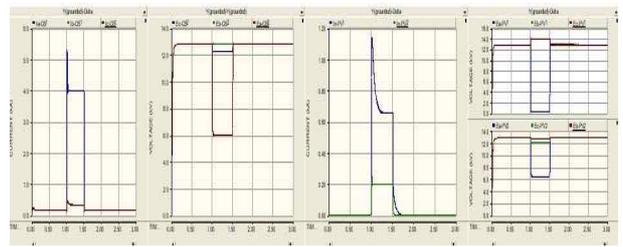
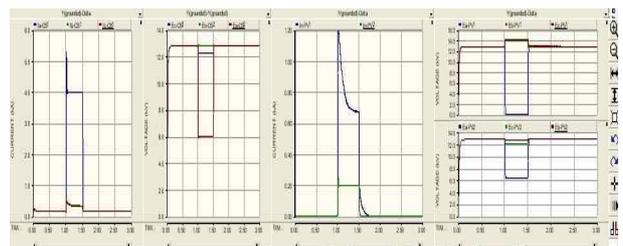


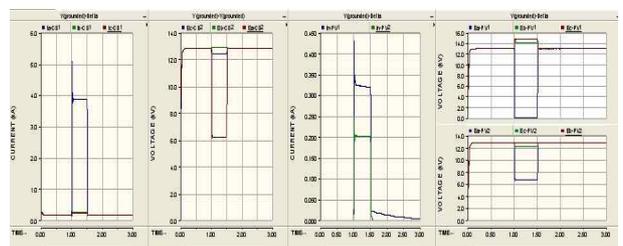
그림 6. PV 위치별 사고 해석을 위한 모의 계통 구성도  
Fig. 6. Simulated system block diagram for the analysis of accident by locations of PV



(a) 말단 연계



(b) 중간 연계



(c) 직하 연계

그림 7. 말단, 중간, 직하 PV 연계 Simulation 결과  
Fig. 7. Results of simulation connected with bottom, middle, under of PV locations

### 3.3 지락사고 위치별 시뮬레이션 및 분석

배전선로 지락사고는 대부분 1선 지락 사고이고 수목접촉 등에 의해 발생되고 있어 지락 위치가 가변적이다. 또한 지락사고 위치에 따라 고장전류가 크게 변하는 특징이 있다. 따라서 동일 용량의 태양광발전설비가 연계되어 있는 배전선로에 그림 8과 같이 각각 직하, 중간, 말단에 SLG fault를 발생시켰을 때 연계용변압기의 중성점에 유입되는 고장전류 등을 분석하였다.

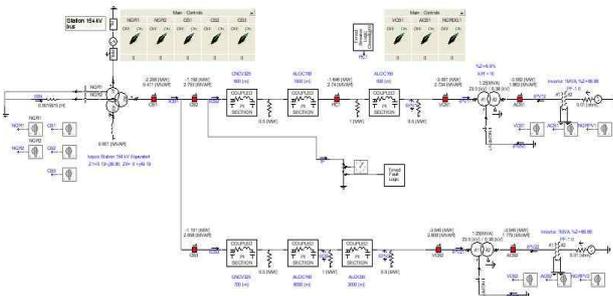


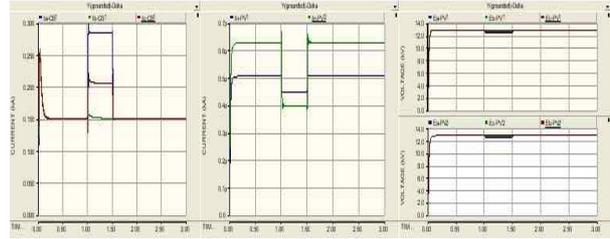
그림 8. 지락 위치별 사고 해석을 위한 모의 계통 구성도  
Fig. 8. Simulated system block diagram for analysis of accident by grounding locations

시뮬레이션 결과 말단 사고의 경우 CBI에 흐르는 고장전류는 0.3[kA], 중간 4[kA], 직하 7[kA]로 배전선로의 일반적 특징에 근접한 결과가 나타났으며, 연계용변압기 중성선에 유입되는 전류는 0.5[kA], 0.6[kA], 0.4[kA]로 나타났고, 지락사고 발생시간 동안 건전상의 전위상승 폭이나 지락이 발생한 A상의 전압강하의 폭은 직하로 갈수록 크게 나타났다.

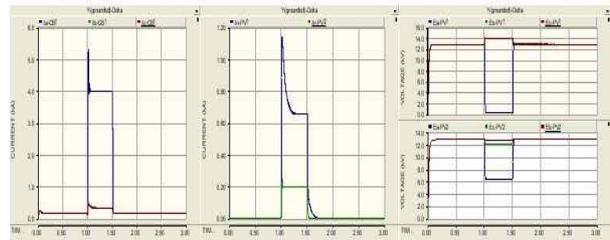
## 4. 개선된 알고리즘 제안

### 4.1 시뮬레이션 결과 분석

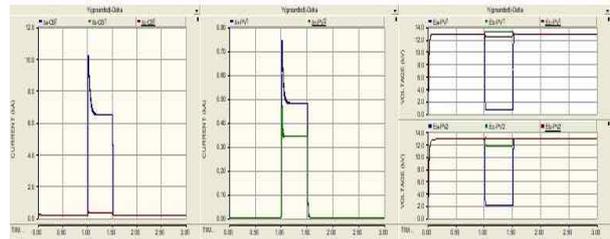
태양광발전설비 시공시 연계용변압기 결선방식이 Y-Δ결선이 주로 적용되는 이유는 PV에서 발생한 고조파의 전원측 유입을 방지하기 위함이며, PV가 연계되는 위치에 따라 연계용변압기 중성점에 유입되는 고장전류가 다른 특성과 지락사고가 발생하는 위치에



(a) 말단 사고



(b) 중간 사고



(c) 직하 사고

그림 9. 말단, 중간, 직하 지락사고 Simulation 결과  
Fig. 9. Results of simulation of bottom, middle, under grounding accident

따라 고장전류가 크게 차이가 있음을 확인하였다.

### 4.2 역조류에 의한 수용가 보호협조 문제점

태양광발전설비가 연계된 계통은 사고사례 및 시뮬레이션 결과에서와 같이 역조류에 의하여 발전 수용가측 사고가 아닌 전원 계통측의 사고에 의해 오동작하게 됨을 검증하였다. 특히 상별고장 위치 및 태양광발전설비 연계위치에 따라 조류방향이 바뀌게 되므로 역조류의 형태에 따라 실시간으로 방향을 판단하는 보호계전기의 설치가 필요하다. 하지만 국내에 시판되고 있는 보호계전기는 정방향, 역방향, 무방향을 수

동으로 조작토록 하는 기능만 있을 뿐 실시간으로 방향을 판단하는 계전기는 없는 것으로 조사되었다.

### 4.3 기존 보호계전기 오동작 방지 알고리즘

역조류에 의한 보호협조 문제점 개선을 위해 조류방향을 실시간으로 판단할 수 있는 보호계전기 오동작 방지 알고리즘 연구가 수행되었고 관련 특허가 출원된바 있다. 동 연구에서 제안된 알고리즘은 그림 10과 같다[3].

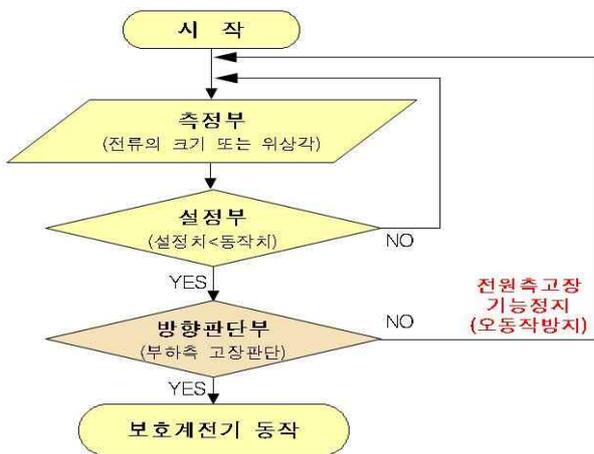


그림 10. 보호계전기 오동작 방지 알고리즘  
Fig. 10. Protective relay malfunction prevention algorithm

### 4.4 개선된 알고리즘 제안

4.3의 기존 보호계전기 오동작 알고리즘은 현재 시장에서 판매되고 있는 OCCR 등 보호계전기가 실시간으로 양방향 조류를 판단하지 못하고 있음을 감안할 때 태양광발전설비 오동작 방지에 크게 기여할 것으로 예상된다.

하지만 동 알고리즘은 보호계전기가 동작하고 난 뒤 태양광발전설비가 계통에서 분리된 상태를 유지하고 있게 된다는 문제가 있다.

전기사업법시행규칙 제41조(안전관리업무의 대행 규모) 1항에서는 수전설비용량 1,000[kW]미만이고, 태양광발전설비용량 1,500[kW]미만인 경우에는 안전

관리담당자가 상주하지 않아도 되도록 규정하고 있어 동 규모 미만의 태양광설비에는 안전관리자가 상주하지 않고 있다.

따라서 보호계전기가 동작한 태양광설비는 누군가가 직접 계통에 연결하지 않는 한 분리된 상태를 유지할 수밖에 없어 태양광발전설비에서 발전된 전기를 계통으로 보내지 못하게 된다. 또한 전원측 고장이 한 전 2011년 정전통계에서와 같이 일시정전이 860건, 순간정전이 5,335건인 점을 감안할 때 순간정전 후 고장요인이 대부분 제거되는 특성이 있어 전원측 고장이 지속되는 경우가 극히 드물다.

따라서 그림 11과 같이 향상된 보호협조를 위해 전원측 고장과 부하측 고장이 제거된 경우 태양광발전설비를 자동으로 계통에 재병입하는 알고리즘을 제안한다. 단 분산형전원 배전계통 연계 기술기준에서 정하고 있는 전압 및 주파수가 정상 범위로 복원된 후 그 범위 내에서 5분간을 유지토록 규정하고 있으므로 알고리즘 세부 설계 시 관련내용이 반영되어야 할 것이다[6].

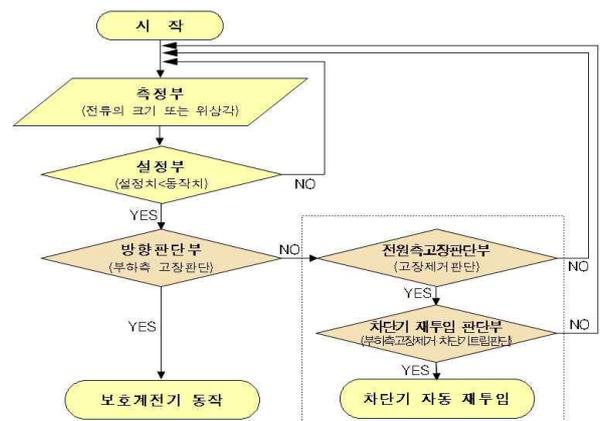


그림 11. 개선된 알고리즘  
Fig. 11. Improved algorithm

## 5. 결론

본 논문에서는 태양광발전설비를 포함한 신재생에너지의 중요성을 배경으로 태양광발전설비의 오동작 사례를 분석하고 다양한 시뮬레이션을 수행하였으며,

태양광발전설비가 연계된 계통의 오동작 사례가 연계 용변압기 결선방식, PV가 연계되는 위치, 지락사고가 발생하는 위치에 따라 역조류에 의해 고장전류가 달라지는 특성 때문임을 검증하였고 이를 바탕으로 보다 향상된 보호협조 체계 구축을 위해 태양광발전설비 연계에 따른 수용가측 보호계전기 오동작 최소화와 태양광발전설비 효율을 극대화 할 수 있는 향상된 알고리즘을 제시하였다.

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

### References

[1] New & Renewable Energy Statistics 2010, Korea Energy Management Corporation, 2011. 11.  
 [2] Dong-yeol Shin, Dong-myung Kim, Han-Ju Cha, "An Overcurrent Analysis in Neutral Line and Algorithm to Prevent Malfunction of Relay in Distributed Generations" KIEE, vol.58, no.8, pp. 1916~1922, 2008. 8.  
 [3] Dong-yeol Shin, Yong-woo Park, Han-Ju Cha, "A Case Study on Malfunction of OCCR and Inaccuracy of Watt-hour Meter in Distributed Generation System", KIEE, vol.57, no.8, pp. 1349~1355 2008. 8.  
 [4] Chan-Hyeok KIM, Yong-Pil Wang, Woo-Ho Kim, Joonho Ahn, Dae-Seok Rho "A Study on the Characteristics Analysis of Fault according to the Winding of Transformer to connect the distributed generation in Distribution System" KIEE Conference Proceedings, 2010. 5.  
 [5] Chan-Hyeok KIM, Hyeon-Seok Park, Dae-Seok Rho, Chang-Hoon Shin, Gi-gab Yoon "A Study on the Optimal Method for Mal-function of Re-closer at the Distribution Feeders Interconnected with PV Systems" KIEE, vol.58, no.10, pp. 1512~1518, 2009. 10.  
 [6] 'Distributed Generation to Connect Distributed System Technical Regulation' KEPCO Distribution Construction Department, 2010. 3.

[7] 'Distributed Generation to Connect Distributed System Guideline' KEPCO Distribution Construction Department, 2010. 3.  
 [8] Dong-yeol Shin, (2009) "An Analysis and Countermeasure for the Reverse-Power-Flow Phenomena of Distribution System Interconnected with Distributed Generations" Thesis, Chungnam National University.  
 [9] Chan-Hyeok KIM, (2010), "A Study on the Bidirectional Protection Coordination Method in Distribution Systems with Dispersed Generation", Thesis, Korea University of Technology and Education.  
 [10] Development of Fault Analysis Evaluation System for Dispersed Power Sources in Distribution Systems, Research Report, ERK, 2009. 8.

### ◆ 저자소개 ◆



#### 황민수 (黃敏洙)

1968년 3월 29일생. 2010년 서울과학기술대학교 전기공학과 졸업. 현재 서울과학기술대학교 산업대학원 전기공학과 석사과정.



#### 전태현 (田太賢)

1967년 1월 31일생. 1989년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1993년 Minnesota 대학교 대학원 졸업(석사). 1997년 Minnesota 대학교 대학원 졸업(박사). 1998년 Motorola 연구원. 2001년 Texas Instruments 연구원. 2005년 한국전자통신연구원(ETRI) 선임 연구원. 현재 서울과학기술대학교 전기정보시스템공학과 교수.

Tel : (02)970-6409

Fax : (02)978-2754

E-mail : thjeon@seoultech.ac.kr