

태양광전원 연계용변압기의 결상사고 검출 알고리즘에 관한 연구

강갑석, 태동현, 이후동, 노대석*
한국기술교육대학교 전기공학과

A Study on Detection Algorithm of Open Phase Fault in Grid-Connected Transformer for PV System

Kab-Seok Kang, Dong-Hyun Tae, Hu-Dong Lee, Dae-Seok Rho*
Department of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 태양광전원이 설치된 배전선로의 단선 등으로 결상사고가 발생하는 경우, 연계용변압기의 철심형태 및 결선 방법에 따라 여러 가지 문제점이 발생할 가능성이 있다. 즉, 단선사고 발생 시 태양광전원 인버터의 단독운전 방지기능에 따라 결상을 감지하여 발전을 정지해야 하지만, 결상을 인지하지 못하고 계속 발전하는 사례가 보고되고 있으며, 연계용 변압기의 역조류 현상으로 인해 결상된 상으로 전원을 공급하여 계통에 악영향을 주는 문제점이 발생하고 있다. 하지만, 기존의 결상사고 보호계전기(Open Phase Relay, 47)는 태양광전원 연계용변압기의 결선방식과 철심형태에 따라 결상된 상에 전압이 유지될 수 있어서, 결상사고 검출이 어려워, 새로운 결상사고 검출 알고리즘이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 전류비교방식의 개념을 이용하여, 연계용변압기 1, 2차측의 전류와 위상을 비교하여 결상사고를 검출하는 새로운 개념의 알고리즘을 제안한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 수배전반, 저압 배전선로, 부하, 연계용변압기, 태양광전원으로 구성된 배전계통과 결상사고 검출 보호장치의 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 결상사고 검출 보호장치를 구현한다. 상기의 모델링과 결상사고 검출 알고리즘을 바탕으로 태양광전원 연계용 변압기의 결선방식과 철심구조에 따라 결상사고 검출 보호장치의 특성을 분석한 결과, 결상 시 연계용변압기의 동작 기울기와 1차측 전류 불평형률이 보호장치의 정정 값(30%)을 초과함에 따라 결상사고가 정확하게 검출되어, 제안한 알고리즘이 결상사고 보호방식에 유용함을 알 수 있었다.

Abstract In the case of open phase faults caused by the disconnection of distribution feeders interconnected to a PV system, many problems can occur depending on the core type and wiring method of the grid-connected transformers. Moreover, open phase faults are difficult to detect because the open phase voltage of the existing protection relay (Open Phase Relay (47)) can be maintained, even though a disconnection fault occurred, depending on the wiring method and the iron core type of the grid-connected transformer for a PV system. Therefore, this paper proposes a novel algorithm to detect open phase faults by comparing the currents and phases between the primary and secondary sides of a grid-connected transformer. In addition, this paper presents the modeling of a distribution system and protection devices for detecting open phase faults using PSCAD/EMTDC S/W, and implements a test protection device for detecting open phase faults based on the above-mentioned modeling. The simulation and test results confirmed that the proposed algorithm is useful for detecting open phase faults according to the wiring method and iron core type of grid-connected transformer for a PV system because operation slope and unbalance rate of the primary current exceed the setting value (30%) of the protection device.

Keywords : Open Phase Fault, PV System, PSCAD/EMTDC, Reverse Power Flow, Grid-Connected Transformer

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 연구(No.20206910100090)와 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 [S2854105] 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Dae-Seok Rho(Korea University of Technology and Education)
email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received February 24, 2021

Revised March 22, 2021

Accepted May 7, 2021

Published May 31, 2021

1. 서론

최근, 정부의 저탄소 녹색성장정책에 따라, 석탄화력과 원전에 대한 의존을 점차적으로 줄여 2040년까지 신재생에너지 발전량 비중을 30~35%로 확대하는 정책을 적극적으로 추진하고 있으며[1-3], 이에 따라 태양광전원 등의 신재생에너지 전원도입이 발전사업자들에 의해 급격히 증가하고 있다[4]. 그러나, 태양광전원이 설치된 배전선로의 단선 등으로 결상사고가 발생하였을 경우, 연계용변압기의 철심형태 및 결선 방법에 따라 여러 가지 문제점이 발생할 가능성이 있다. 즉, 결상사고 발생 시 태양광전원 인버터의 단독운전 방지기능에 따라 결상을 감지하여 발전을 정지해야[5] 하지만, 결상을 인지하지 못하고 계속 발전하는 사례가 보고되고 있으며, 계통연계용 변압기의 역조류 현상으로 인해 결상된 상으로 전원을 공급하는 문제점이 발생하고 있다. 이러한 역조류로 인해 연계용변압기가 과부하로 소손될 수 있으며, 배전선로 작업자는 결상으로 인한 정전으로 판단하여 감전사고가 발생할 가능성이 있다[6-10].

상기의 문제점을 해결하기 위하여, 결상사고 발생 시 신속하게 결상을 검출하여 보호장치를 동작시켜야 하지만, 기존에 사용되고 있는 결상사고 보호방식(Open Phase Relay, 47)은 측정된 전압이 정정치 이하가 되었을 때 동작하는 방식을 채용하고 있으므로, 결상사고 검출이 어려워, 새로운 결상사고 검출 알고리즘이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 전류비교방식의 개념을 이용하여, 연계용변압기 1, 2차측의 전류와 위상을 비교하여 결상사고를 검출하는 새로운 개념의 알고리즘을 제안한다. 또한, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여, 수배전반, 저압배전선로, 부하, 연계용변압기, 태양광전원으로 구성된 배전계통과 결상사고 검출 보호장치의 모델링을 수행하고, 이를 바탕으로 결상사고 검출 보호장치를 구현한다. 상기의 모델링과 결상사고 검출 알고리즘을 바탕으로 태양광전원 연계용변압기의 결선방식과 철심구조에 따라 결상사고 검출 보호장치의 특성을 분석하여, 본 논문의 검출 알고리즘이 결상사고 보호방식에 유용함을 제시한다.

2. 태양광전원 연계용변압기의 결상사고 검출 알고리즘

2.1 태양광전원 연계용변압기의 결상사고 특성

변압기의 구조는 크게 권선과 철심으로 구성되어 있으며, 권선의 결선방식과 철심 구조에 따라 전기적인 특성이 다르게 나타나고 있다. 먼저 태양광전원 연계용변압기 권선의 결선방식은 Y- Δ 결선방식을 주로 사용하고 있으며, 일부는 Y-Y 결선방식을 사용하는 경우도 있다. 또한 변압기의 철심구조는 크게 내철형과 외철형으로 구분하며, 내철형 변압기는 3각 철심과 5각 철심 형태로 구분하고 있다. 태양광전원 연계용변압기는 경제성 및 점유면적 측면에서 유리한 3각 철심형태를 많이 사용하고 있으며, 5각 철심형태는 154kV 이상 초고압 계통에 주로 사용하고 있다. 한편, 단상변압기 3개를 1개의 Bank로 조합하여 3상으로 사용하는 방식이 있는데, 전기적 특성(전압유기, 전력조류 등)은 5각 철심과 동일하다.

그러나, 태양광전원이 연계된 배전계통에서 배전선로의 1상이 단선되는 등의 결상사고가 발생하는 경우, Fig. 1과 같이 태양광전원이 계통에서 분리되어야 하지만 결상사고를 감지하지 못하고 계속 발전하는 현상(단독운전)과 연계용변압기의 역조류 현상으로 인해 배전선로의 결상된 상으로 전력을 공급하여 계통에 악영향을 주는 현상이 발생할 수 있다.

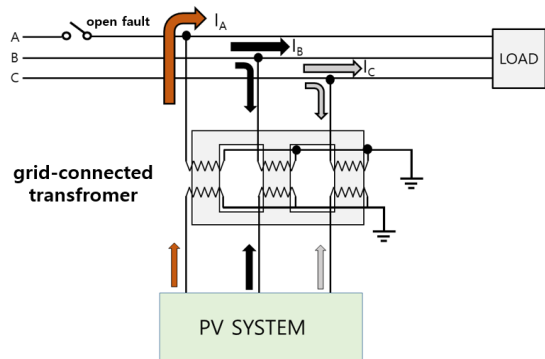


Fig. 1. Phenomenon of reverse power flow for grid-connected transformer

상기의 문제점을 해결하기 위하여, 결상사고 발생 시 결상을 검출하여 태양광전원을 계통에서 신속하게 분리해야 한다. 하지만, 기존에 사용되고 있는 결상사고 보호방식은(OPR, 47) 측정된 전압이 정정치 이하가 되었을 때 동작하는 방식을 채용하고 있다. 따라서, 상기 방식의 결상사고 보호계전기는 태양광전원 연계용변압기의 결선방식과 철심형태에 따라 결상된 상에 전압이 유지될 수 있으므로 결상사고 검출이 어려워 새로운 결상사고 검출 알고리즘이 요구되고 있다.

2.2 결상사고 검출 알고리즘

연계용변압기의 1차측 전류와 2차측 전류는 정상상태에서 Fig. 2와 같이 항상 동일한 값을 가진다. 그러나, 결상사고 발생 시 인버터의 단독운전과 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.

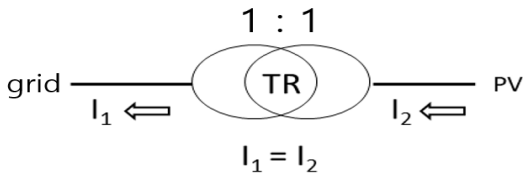


Fig. 2. Current of transformer in normal state

즉, 본 논문에서는 상기의 전류비교방식의 개념을 이용하여, Fig. 3과 같이 연계용변압기 1, 2차측에 변류기(CT)를 설치하고 1, 2차측의 전류와 위상을 비교하여 결상사고를 검출하는 알고리즘을 제안한다.

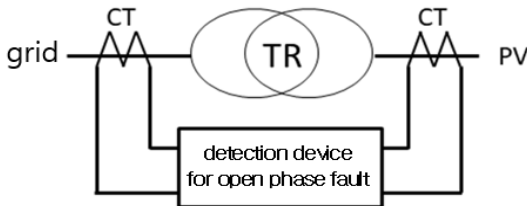


Fig. 3. Installation of detection device for open phase fault

상기에서 제안한 결상사고 검출 알고리즘을 구체적으로 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 기울기(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)

식 (1) ~ 식 (3)을 통해, 산정된 동작전류(I_d)와 제한전류(I_r) 및 동작 기울기를 바탕으로 결상사고 검출 보호장치의 동작범위를 나타내면 Fig. 4와 같다. 여기서, Fig. 4의 ①구간은 정상상태에서 측정 오차에 의한 오동작을 방지하기 위해 최소 동작전류(I_{d1})를 설정하는 영역을 나타내고, Fig. 4의 ②번 구간은 결상사고 시, 역조류 현상으로 인해 발생하는 연계용변압기 1차 및 2차측 전류의 차를 고려하여 결상을 검출하기 위한 기울기(a_1)를 설정한다. 또한, Fig. 4의 ③번 구간은 계기용 변류기 포화특성을 고려하여 무릎점(knee point, I_k)을 상정하여 포화시 발생하는 변류기 측정 오차를 고려하여 보호장치가 오동작하지 않도록 기울기(a_2)를 보정하는 영역을 나타낸다.

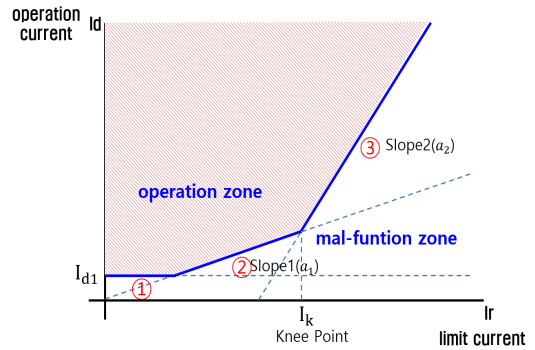


Fig. 4. Operation curve of detection device for open phase fault

따라서, Fig. 4의 ①구간은 식 (4)와 같이 제한전류가 0 이상이고, 동시에 I_{d1}/a_1 미만에서 산정되고, Fig. 4의 ②구간은 식 (5)와 같이 제한전류가 I_{d1}/a_1 이상이고, 동시에 I_k 미만에서 계산되며, Fig. 4의 ③구간은 식 (6)과 같이 제한전류가 I_k 이상에서 결정된다.

$$I_{ds}(I_r) = I_{d1} \quad (0 \leq I_r < \frac{I_{d1}}{a_1}) \quad (4)$$

$$I_{ds}(I_r) = a_1 I_r \quad (\frac{I_{d1}}{a_1} \leq I_r < I_k) \quad (5)$$

$$I_{ds}(I_r) = a_2 I_r + I_k(a_1 - a_2) \quad (I_k \leq I_r) \quad (6)$$

여기서, I_{ds} : 동작전류, I_r : 제한전류, I_{d1} : 최소 동작전류의 설정값, a_1, a_2 : 기울기 설정값, I_k : 무릎점

즉, 변압기 1차 및 2차측 전류를 바탕으로 결상사고 검출 알고리즘에 의하여 Fig. 4의 어느 한 좌표가 결정되고, 이 좌표가 결상사고 보호장치에서 정정한 동작영역에 위치하면, 결상사고로 판단하게 된다. 한편, 외부 지락사고에 의한 오동작을 방지하기 위해, 변압기 1차측 전류의 불평형률을 식 (7)과 같이 산정하고, 이 값이 정정치 이상일 경우에만 결상사고로 판단하여, 보호장치를 동작시킨다.

$$U_r = \frac{|\max(I_1)| - |\min(I_1)|}{(|I_{1,a}| + |I_{1,b}| + |I_{1,c}|) \times \frac{1}{3}} \times 100 \quad (7)$$

여기서, U_r : 변압기 1차측 전류 불평형률, $I_{1,a}$: 변압기 1차측의 a상 전류, $I_{1,b}$: 변압기 1차측의 b상 전류, $I_{1,c}$: 변압기 1차측의 c상 전류

한편, 연계용변압기는 결선방식(Y- Δ 또는 Δ -Y)에 따라 1차와 2차측에 30° 위상차가 발생하므로 위상각을 보정해야 하며, 변압비에 따른 1, 2차 전류 크기도 고려해야 한다. 즉, 연계용변압기의 각 변위가 YNd1이고 변압비가 380/220[V]인 경우, 위상각은 1차보다 2차측이 30° 차이가 나므로 2차측에 +30°를 보정해서 1차측 위상과 동일하게 하고, 전류의 크기는 2차측 전류가 1차측 전류보다 $\sqrt{3}$ 배이므로 2차측 전류에 $1/\sqrt{3}$ 배를 곱하여 계산해야 한다.

2.3 결상사고 보호장치의 운영 알고리즘

상기의 결상사고 검출 알고리즘에 따라 결상사고 보호장치의 운영 알고리즘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- [STEP 1] 태양광전원 연계용변압기의 변압비, 변류비, 각 변위, 용량을 상정한다.
- [STEP 2] 결상사고 검출 보호장치의 정정치인 최소동작전류, 무류점, 동작 기울기, 전류 불평형률을 산정한다. 이 정정치에 의한 보호장치의 동작 곡선은 Fig. 4에 의하여 결정된다.
- [STEP 3] 연계용변압기의 1차측 및 2차측 전류 크기 및 위상을 측정하여, 식 (1) ~ 식 (2)에 대입하여, 각 상의 동작전류와 제한전류를 계산한다.
- [STEP 4] 각 상의 동작전류와 제한전류에 대하여, 동작범위에 포함되는가를 판단한다. 만약, 포함될 경우 [STEP 5]로 진행하고, 포함되지

않을 경우 [STEP 3]으로 이동한다.

[STEP 5] 식 (7)에 따라 전류 불평형률을 계산하고 이 값이 정정치 이상인가를 판단한다. 만약, 정정치 이상이 될 경우, 결상사고로 판단하여 보호장치를 동작시킨다.

상기의 절차를 플로우차트로 나타내면 Fig. 5와 같다.

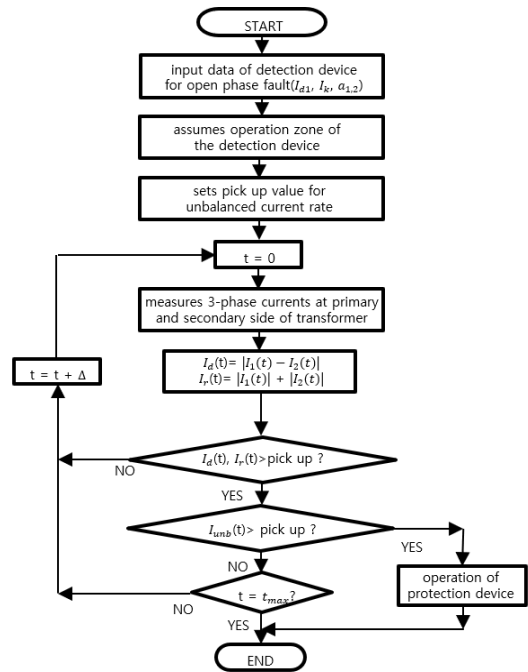


Fig. 5. Operation algorithm of detection device for open phase fault

3. PSCAD/EMTDC에 의한 결상사고 검출 보호장치 모델링

3.1 연계용변압기의 결상사고 모델링

태양광전원이 연계된 배전계통에서 연계용변압기의 결선방법 및 철심 구조별로 보호장치 동작특성을 분석하기 위하여, 배전계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하면 Fig. 6과 같다. 여기서, 배전선로의 A상이 단선되는 결상상태를 차단기(CB, circuit breaker)로 모의하고, 연계용변압기 1차측 배전선로에는 3상부하가 연결된 것으로 나타낸다. 또한, 연계용변압

기는 PSCAD/EMTDC의 라이브러리에서 제공하는 UMEC(unified magnetic equivalent circuit) 모델을 사용한다[11]. 이 모델에서는 3상 2권선 변압기로 결선 방법을 Y-Y, Y-Δ 형태로 변경하여 해석할 수 있으며, 철심구조를 3각 철심, 5각 철심, 단상 변압기의 형태로 변경하여 해석할 수 있다.

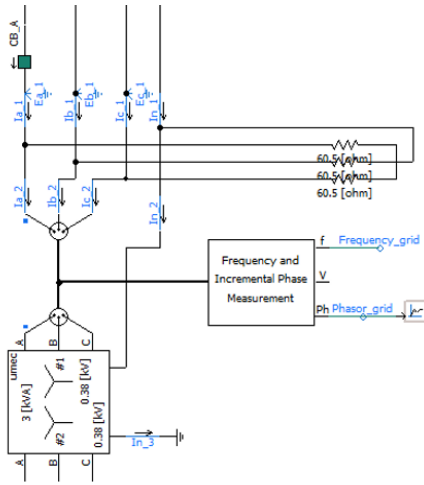


Fig. 6. Modeling of current controller for PV system

3.2 태양광전원 모델링

태양광전원의 계통연계용 인버터에 대하여 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 제어하기 위해, PI제어기를 이용한 세부적인 전류제어 알고리즘은 식 (8)과 식 (9)와 같고, 이 제어기를 모델링하면 Fig. 7과 같다. 여기서, 인버터의 전류 제어부는 유효전력과 디커플링 회로이기 때문에 무효전력을 서로 독립적으로 제어할 수 있다.

$$V_d = (I_{ref-d} - I_d) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) - I_q \cdot \omega L + V_{sq} \quad (8)$$

$$V_q = (I_{ref-q} - I_q) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) - I_d \cdot \omega L \quad (9)$$

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

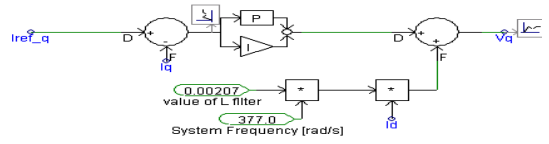
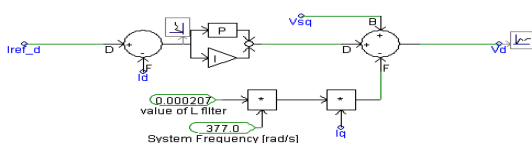


Fig. 7. Modeling of current controller for PV system

상기의 식 (8), (9)에서 구한 V_d 와 V_q 는 d-q 좌표변환을 통해 3상의 전압으로 변환되며, IGBT를 구동시키기 위한 6개의 신호로 사용되는 PWM을 모델링하면, Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다.

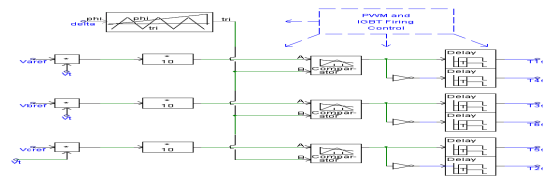


Fig. 8. Modeling of PWM controller for PV system

한편, 상기의 제어를 수행하는 계통연계용 인버터를 모델링하면 Fig. 9와 같고, PWM으로부터 나온 6개의 스위칭 신호에 의하여 태양광전원에서 생성된 DC 출력을 120°의 위상차를 갖는 3상의 AC출력으로 변환시킨다.

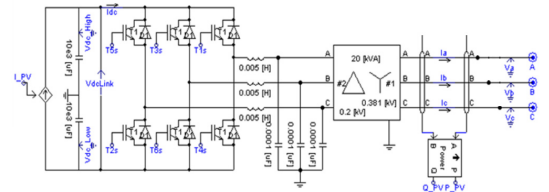


Fig. 9. Modeling of grid-connected inverter

3.3 결상사고 검출 보호장치 모델링

결상사고 발생 시, 이를 감지할 수 있는 결상사고 검출 보호장치를 모델링하면 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, Fig. 10의 A 부분은 식 (1) ~ 식 (6)으로 산정되는 결상사고 검출 동작곡선을 나타내며, 동작전류와 제한전류를 계산하여 동작영역에 해당하는지 판단한다. 또한, Fig. 10의 B 부분은 외부 지락사고에 의한 보호장치의 오동작을 방지하기 위해, 식 (7)에 따라 변압기 1차측 전류의 불평형률을 산정하고, 정정치를 초과하는지 판단한다. 한편, Fig. 10의 C 부분은 A와 B의 두 가지 조건을 모두 만족할 경우, 동작신호를 보호장치에 전달한다.

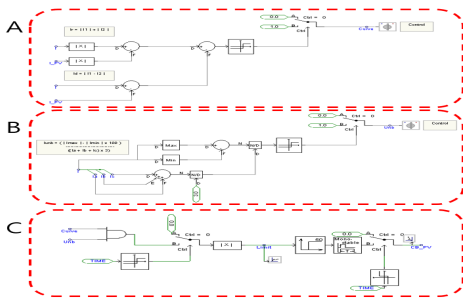


Fig. 10. Modeling of detection device for open phase fault

3.4 전체계통 모델링

상기의 내용을 바탕으로 전체 계통을 모델링하면 Fig. 11과 같다. 여기서, Fig. 11의 A 부분은 수배전반, B 부분은 저압배전선로 및 부하, C 부분은 연계용변압기, D 부분은 태양광전원과 결상사고 검출 보호장치를 나타낸 것이다.

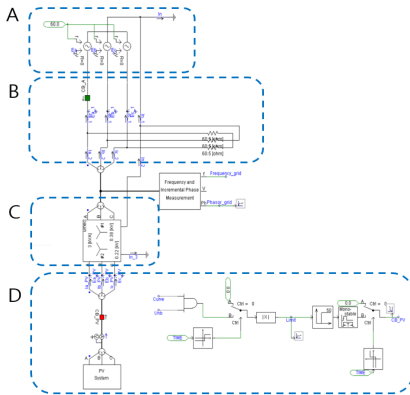


Fig. 11. Modeling of entire system

4. 태양광전원 연계용변압기의 결상사고 검출 보호장치의 구현

본 논문에서 태양광전원이 연계된 배전계통에서 한 상이 단선되는 결상사고의 경우, 제한한 결상사고 검출 알고리즘이 연계용변압기의 결선방법 및 철심구조별로 결상보호에 유용함을 확인하기 위하여, Fig. 12와 같이 태양광전원, 인버터, 연계용변압기, 수용가부하로 구성되어 있는 축약된 배전계통과 결상사고 검출 보호장치를 구현한다. 이 그림에서와 같이, 축약된 배전계통은 3상4선식

380/220V 전원을 사용하며, 연계용변압기, 결상시험용 CB, 그리고 저항부하로 구성된다. Fig. 12의 (a)는 Y-Y 결선 변압기의 결상사고 검출 보호장치를 나타내며, Fig. 12의 (b)는 Y- Δ 결선 변압기의 결상사고 검출 보호장치를 나타낸다. 여기서, 연계용변압기의 권수비는 1:1이고, 변압기 철심은 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 \times 3)를 연결한다. 또한, 변압기 양단의 계측지점 1, 2번 사이에 결상사고 검출 보호장치를 연결하여 전압과 전류의 크기 및 위상을 측정하고, 결상 시험용 CB에서 결상사고를 발생시킨 후 결상사고 검출 보호장치의 동작특성을 확인한다.

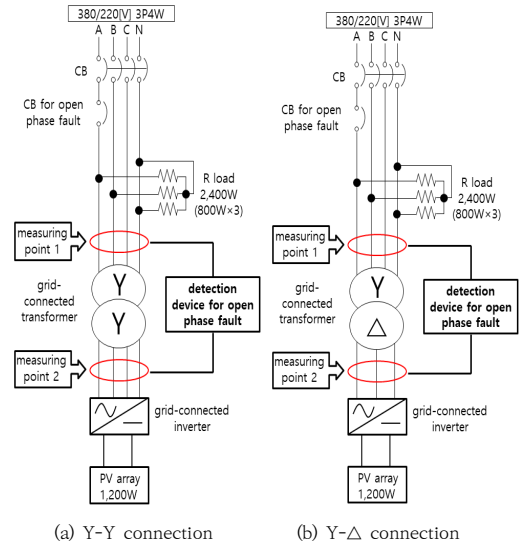


Fig. 12. Circuit of detection device for open phase fault

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

본 논문에서 제한한 태양광전원 연계용변압기의 결상사고 검출 알고리즘을 평가하기 위하여, 연계용변압기 및 각 구성요소의 시험 파라미터와 조건은 Table 1, Table 2와 같이 상정한다. 여기서, Table 1은 연계용변압기 및 부하용량 파라미터이며, 3각 철심 및 5각 철심 구조의 변압기는 3상 3kVA를 사용하고, 단상변압기는 1kVA 3대

로 3상 결선하여 구성한다. 또한, Table 2는 결상사고 검출 보호장치의 설정조건을 나타내며, 변압비는 Y-Y결선의 경우 380/380[V]이고, Y- Δ 결선은 380/220[V]이며, 동작 기울기와 1차 전류 불평형률은 30[%]로 설정한다. 그리고, 결상사고는 A상이 단선된 경우로 상정하며, 연계용변압기 1차측의 각 상에 저항부하 2,400W(800W \times 3)를 연계한다.

Table 1. Parameters for load capacity and transformer

items	3-limb iron core	5-limb iron core	3-phase bank
phases	3 ϕ	3 ϕ	1 ϕ
capacity of transformer[kVA]	3kVA \times 1	3kVA \times 1	1kVA \times 3
frequency[Hz]	60	60	60
load capacity[W]	2,400 (800W \times 3)	2,400 (800W \times 3)	2,400 (800W \times 3)

Table 2. Setting conditions of detection device for open phase fault

items		values
voltage ratio	Y-Y connection	380/380[V]
	Y- Δ connection	380/220[V]
current ratio	primary	5/5[A]
	secondary	5/5[A]
vector	Y-Y connection	YNyn0
	Y- Δ connection	YNd1
minimum operation current		1.5[A]
knee point current		25[A]
operating slope1		30[%]
operating slope2		50[%]
unbalanced load rate		30[%]

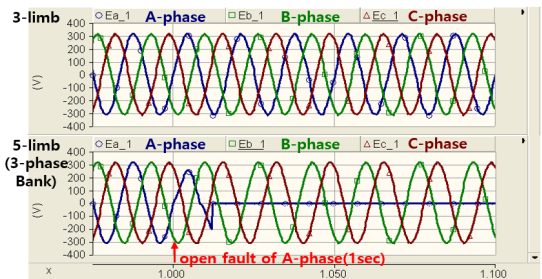
5.2 PSCAD/EMTDC에 의한 결상사고 검출 보호장치 특성 분석

(1) Y-Y 결선 변압기의 보호장치 특성 분석

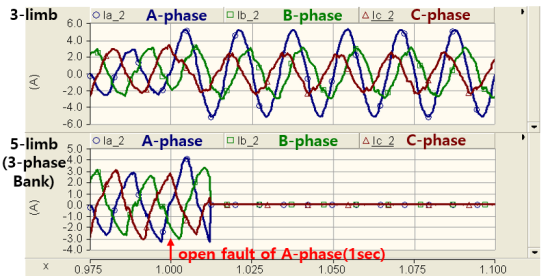
3장에서 제시한 PSCAD/EMTDC의 모델링에 의하여 연계용변압기가 Y-Y 결선인 경우, 연계용변압기의 1차측 A상이 단선되는 상태의 결상사고 검출 보호장치의 특성을 나타내면 Fig. 14와 Table 3과 같다. 여기서, Fig. 14의 (a)와 Table 3의 (a)는 결상사고 시의 전압 특성을 분석한 것으로, 변압기가 3각 철심인 경우에는 결상된 A상의 1차측 및 2차측 전압이 각각 219[V], 220[V]가 유지되며, 5각 철심과 단상변압기의 경우, 1차측 및 2차측 전압이 모두 유지되지 않음을 알 수 있다. 따라서, Y-Y 결선의 5각 철심과 단상변압기에서 단선된 경우, 결상된

상의 전압이 0[V]로 측정되므로 기존의 결상사고 보호방식(OPR, 47)으로 검출이 가능하지만, 3각 철심의 경우에는 전압이 유지되므로 검출이 불가능함을 알 수 있다.

한편, Fig. 14의 (b)와 Table 3의 (b)는 결상사고 검출 보호장치의 동작특성을 분석한 것으로, 3각 철심의 변압기인 경우에는 결상된 A상에 3.6 \angle -3 $^{\circ}$ [A]의 전류가 공급되지만, 5각 철심 및 단상변압기에서는 전류가 공급되지 않음을 알 수 있다. 즉, 결상된 상은 태양광전원 인버터에서 공급하는 전류와 정상상태인 B, C상에서 A상으로 공급하는 역조류 형태의 전류가 더해져서 공급되고 있음을 알 수 있다. 또한, 3각 철심의 경우, 동작 기울기는 A상 33.6[%], B상 50[%], C상 51[%]이며, 1차전류 불평형률은 87[%]이므로 두 가지 조건 모두 보호장치의 정정 값(30[%])을 초과하여, 제한한 결상사고 검출 알고리즘에 따라 보호장치는 결상사고로 판단하여 동작함을 알 수 있다. 따라서, Y-Y 결선의 5각 철심과 단상변압기 타입은 기존에 사용되는 결상사고 보호방식을 채용하고, 3각 철심 변압기는 제한한 결상사고 검출 알고리즘에 따라 결상사고를 검출해야 함을 알 수 있다. 또한, 연계용변압기의 결선방법 및 철심구조에 따라 적절한 결상사고 보호장치를 설치하지 않을 경우, 단선사고가 발생하면 결상을 감지하지 못하고 인버터의 단독운전에 의하여 계통에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.



(a) Voltage characteristics of Y-Y connection transformer



(b) Current characteristics of Y-Y connection transformer

Fig. 14. Voltage and current characteristics of Y-Y connection transformer

Table 3. Characteristics of detection device for open phase fault in Y-Y connection transformer
(a) Voltage characteristics

items		3-limb	5-limb/3-phase bank
voltage at primary side [V]	A-N	219	0
	B-N	220	220
	C-N	220	220
voltage at secondary side [V]	a-n	220	0
	b-n	218	220
	c-n	221	220

(b) Operation characteristics

items	3-limb			5-limb/3-phase bank		
	A	B	C	A	B	C
current at primary side	3.6 $\angle -3^\circ$	1.96 $\angle -67^\circ$	1.54 $\angle 60^\circ$	0	0	0
current at secondary side	1.82 $\angle 6^\circ$	1.76 $\angle -126^\circ$	1.97 $\angle 120^\circ$	0	0	0
limit current	5.42	3.72	3.51	-	-	-
operation current	1.82	1.86	1.79			
operation slope	33.6	50	51	-	-	-
unbalanced load rate	87			-		
operation decision	operation			-		

(2) Y- Δ 결선 변압기의 보호장치 특성 분석

연계용변압기가 Y- Δ 결선인 경우, 연계용변압기의 1차측 A상이 단선되는 상태의 결상사고 검출 보호장치의 특성을 나타내면 Table 4와 같다. 여기서, Table 4의 (a)는 결상사고 시의 전압 특성을 분석한 것으로, 연계용 변압기의 철심구조와 관계없이 모든 변압기에서 결상된 A상의 1차측 및 2차측 전압이 216[V] ~ 219[V]가 유지됨을 알 수 있다. 따라서, Y- Δ 결선의 연계용변압기에서 단선된 경우, 철심구조와 관계없이 결상된 상에 전압이 유지되므로 기존의 결상사고 보호방식(OPR, 47)으로 검출이 불가능함을 알 수 있다.

한편, Table 4의 (b)는 결상사고 검출 보호장치의 동작특성을 분석한 것으로, 3각 철심의 변압기인 경우에는 결상된 A상에 3.63 $\angle -3^\circ$ [A]의 전류가 공급되며, 5각 철심 및 단상변압기에서는 결상된 A상에 3.61 $\angle -3^\circ$ [A]의 전류가 공급됨을 알 수 있다. 또한, 모든 철심구조에서 동작 기율기와 1차전류 불평형률은 보호장치의 정정 값(30%)을 초과하여, 제안한 결상사고 검출 알고리즘에 따라 보호장치는 결상사고로 판단하여 동작함을 알 수 있다. 따라서, Y- Δ 결선은 철심구조와 관계없이 제안한 결상사고 검출 알고리즘에 따라 결상사고를 검출해야 함을 알 수 있다. 또한, 연계용변압기의 결선방법 및 철심구조에 따라 적절한 결상사고 보호장치를 설치하지 않을

경우, 단선사고가 발생하면 결상을 감지하지 못하고 인버터의 단독운전에 의하여 계통에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

Table 4. Characteristics of detection device for open phase fault in Y- Δ connection transformer

(a) Voltage characteristics

items		3-limb	5-limb/3-phase bank
voltage at primary side [V]	A-N	219	218
	B-N	220	220
	C-N	220	220
voltage at secondary side [V]	a-b	217	216
	b-c	222	222
	c-a	219	219

(b) Operation characteristics

items	3-limb			5-limb/3-phase bank		
	A	B	C	A	B	C
current at primary side	3.63 $\angle -3^\circ$	1.89 $\angle -62^\circ$	1.72 $\angle 59^\circ$	3.61 $\angle -3^\circ$	2.02 $\angle -65^\circ$	1.6 $\angle 56^\circ$
current at secondary side	3.14 $\angle -30^\circ$	3.15 $\angle -150^\circ$	3.13 $\angle 90^\circ$	3.1 $\angle -30^\circ$	3.19 $\angle -150^\circ$	3.16 $\angle 90^\circ$
limit current	5.44	3.71	3.53	5.4	3.86	3.42
operation current	1.81	1.85	1.79	1.83	1.79	1.82
operation slope	33.3	49.9	50.7	33.8	46.3	53.3
unbalanced load rate	79.1			83.4		
operation decision	operation			operation		

5.3 결상사고 검출 보호장치에 의한 특성 분석

(1) Y-Y 결선 변압기의 보호장치 특성 분석

4장에서 제시한 결상사고 검출 보호장치에 의하여 연계용변압기의 1차측 A상이 단선되는 경우, 결상사고 검출 보호장치의 동작특성을 나타내면 Table 5와 같다. 여기서, Table 5의 (a)는 결상사고 시의 전압 특성을 분석한 것으로, 변압기가 3각 철심인 경우에는 결상된 A상의 1차측 및 2차측 전압이 각각 211[V], 216[V]가 유지되며, 5각 철심과 단상변압기의 경우, 1차측 및 2차측 전압이 모두 유지되지 않아, 5.2절의 (1)항과 같이 시뮬레이션 결과와 거의 유사함을 알 수 있다.

한편, Table 5의 (b)는 결상사고 검출 보호장치의 동작특성을 분석한 것으로, 3각 철심인 경우에는 결상된 A상에 3.17 $\angle -2^\circ$ [A]의 전류가 공급되지만, 5각 철심 및 단상변압기에서는 전류가 공급되지 않음을 알 수 있다. 여기서, 3각 철심의 경우 동작 기율기는 A상 37.1%, B상 54.5%, C상 41.9%이며, 1차전류 불평형률은 92%이므로 두 가지 조건 모두 보호장치의 정정 값(30%)을 초과하여 제안한 결상사고 검출 알고리즘에

따라 보호장치는 결상사고로 판단하여 동작함을 알 수 있다. 따라서, 연계용변압기가 Y-Y 결선인 경우 시뮬레이션 결과와 유사한 특성을 확인하여, 본 논문에서 제안한 결상사고 검출 보호장치의 유효성을 확인하였다.

Table 5. Characteristics of detection device for open phase fault in Y-Y connection transformer

(a) Voltage characteristics

items	3-limb	5-limb/3-phase bank
voltage at primary side [V]	A-N	211
	B-N	219
	C-N	221
voltage at secondary side [V]	a-n	216
	b-n	221
	c-n	221

(b) Operation characteristics

items	3-limb			5-limb/3-phase bank		
	A	B	C	A	B	C
current at primary side	3.17 ∠-2°	1.6 ∠-75°	1.3 ∠65°	0	0	0
current at secondary side	1.46 ∠4°	1.61 ∠-141°	1.49 ∠114°	0	0	0
limit current	4.63	3.21	2.79	-	-	-
operation current	1.72	1.75	1.17	-	-	-
operation slope unbalanced load rate	37.1	54.5	41.9	-	-	-
operation decision	92			-		
operation decision	operation			-		

(2) Y-Δ 결선 변압기의 보호장치 특성 분석

연계용변압기의 1차측 A상이 단선되는 경우, 결상사고 검출 보호장치의 동작특성을 나타내면 Table 6과 같다. 여기서, Table 6의 (a)는 결상사고 시의 전압 특성을 분석한 것으로, 연계용변압기의 철심구조와 관계없이 모든 변압기에서 결상된 A상의 1차측 및 2차측 전압이 206[V] ~ 216[V]가 유지되어 5.2절의 (2)항과 같이 시뮬레이션 결과와 거의 유사함을 알 수 있다.

한편, Table 6의 (b)는 결상사고 검출 보호장치의 동작특성을 분석한 것으로, 3각 철심인 경우에는 결상된 A상에 3.17∠1°[A]의 전류가 공급되며, 5각 철심 및 단상 변압기에서는 결상된 A상에 3.21∠1°[A]의 전류가 공급됨을 알 수 있다. 또한, 모든 철심구조에서 동작 기율기와 1차전류 불평형률은 보호장치의 정정 값(30%)을 초과하여, 제안한 결상사고 검출 알고리즘에 따라 보호장치는 결상사고로 판단하여 동작함을 알 수 있다. 따라서, 연계용변압기가 Y-Δ 결선인 경우 시뮬레이션 결과와 유사한 특성을 확인하여, 본 논문에서 제안한 결상사고 검출 보

호장치의 유효성을 확인하였다.

Table 6. Characteristics of detection device for open phase fault in Y-Δ connection transformer

(a) Voltage characteristics

items	3-limb	5-limb/3-phase bank
voltage at primary side [V]	A-N	206
	B-N	218
	C-N	221
voltage at secondary side [V]	a-b	215
	b-c	223
	c-a	216

(b) Operation characteristics

items	3-limb			5-limb/3-phase bank		
	A	B	C	A	B	C
current at primary side	3.17 ∠1°	2.17 ∠-66.5°	1.25 ∠71.5°	3.21 ∠1°	1.7 ∠-64.6°	1.51 ∠68.5°
current at secondary side	2.39 ∠-31.9°	3.27 ∠-163°	3.13 ∠87°	2.39 ∠-33°	3.27 ∠-167°	3.13 ∠85°
limit current	4.56	4.05	3.06	4.59	3.59	3.32
operation current	1.79	2.23	1.33	1.84	2.12	1.34
operation slope unbalanced load rate	39.3	55.1	43.5	40.1	59.1	40.3
operation decision	87			79		
operation decision	operation			operation		

5.4 종합분석

(1) Y-Y 결선 변압기의 보호장치 특성 분석

연계용변압기의 1차측 A상이 단선되는 상태의 결상사고 검출 보호장치의 특성에 대하여, PSCAD/EMTDC의 시뮬레이션 값과 결상사고 검출 보호장치에 의한 결과를 비교하면, Table 7과 같이 거의 유사함을 알 수 있다. 즉, Table 7의 (a)와 같이 5각 철심과 단상변압기의 경우, 결상된 상에 전압을 유지하지 않으므로 기존의 결상사고 보호방식(OPR, 47)으로 검출이 가능하지만, 3각 철심 변압기는 결상된 상에 전압이 유지되므로 기존의 결상사고 보호방식으로 결상검출이 어려워, 제안한 결상사고 검출 알고리즘에 따라 결상사고를 검출해야 함을 알 수 있다. 또한, Table 7의 (b)와 같이 변압기가 3각 철심인 경우, 동작 기율기와 1차전류 불평형률은 보호장치의 정정 값(30%)을 초과하여, 제안한 결상사고 검출 알고리즘에 따라 보호장치는 결상사고로 판단하여 동작함을 알 수 있다. 따라서, Y-Y 결선의 5각 철심과 단상 변압기 타입은 기존에 사용되는 결상사고 보호방식을 채용하고, 3각 철심 변압기는 제안한 결상사고 검출 알고리즘에 따라 결상사고를 검출해야 함을 알 수 있다. 또한, 연계용변압기의 결선방법 및 철심구조에 따라 적절한 결

상사고 보호장치를 설치하지 않을 경우, 단선사고가 발생하면 결상을 감지하지 못하고 인버터의 단독운전에 의하여 계통에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

Table 7. Characteristics of detection device for open phase fault in Y-Y connection transformer

(a) Voltage characteristics

items		3-limb			5-limb/3-phase bank		
		PSCAD		test device	PSCAD		test device
voltage at primary side [V]	A-N	219	211	0	0		
	B-N	220	219	220	220		
	C-N	220	221	220	221		
voltage at secondary side [V]	a-n	220	216	0	0		
	b-n	218	221	220	219		
	c-n	221	221	220	221		

(b) Operation characteristics

items	3-limb						5-limb / 3-phase bank					
	PSCAD			test device			PSCAD			test device		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
operation slope	33.6	50	51	37.1	54.5	41.9	-	-	-	-	-	-
unbalanced load rate	87			92			-			-		
operation decision	operation			operation			-			-		

(2) Y- Δ 결선 변압기의 보호장치 특성 분석

연계용변압기의 1차측 A상이 단선되는 상태의 결상사고 검출 보호장치의 동작특성에 대하여, PSCAD/EMTDC의 시뮬레이션 값과 결상사고 검출 보호장치에 의한 결과를 비교하면, Table 8과 같이 거의 유사함을 알 수 있다. 즉, Table 8의 (a)와 같이 연계용변압기가 Y- Δ 결선은 철심구조와 관계없이 모든 변압기에서 결상된 상에 전압을 유기하므로 기존의 결상사고 보호방식(OPR, 47)으로 결상검출이 어려워 제안한 결상사고 검출 알고리즘에 따라 결상사고를 검출해야 함을 알 수 있다. 또한, Table 8의 (b)와 같이 모든 철심구조에서 동작 기울기와 1차전류 불평형률은 보호장치의 정정 값(30%)을 초과하여, 제안한 결상사고 검출 알고리즘에 따라 보호장치는 결상사고로 판단하여 동작함을 알 수 있다. 따라서, Y- Δ 결선은 철심구조와 관계없이 제안한 결상사고 검출 알고리즘에 따라 결상사고를 검출해야 함을 알 수 있다. 또한, 연계용변압기의 결선방법 및 철심구조에 따라 적절한 결상사고 보호장치를 설치하지 않을 경우, 단선사고가 발생하면 결상을 감지하지 못하고 인버터의 단독운전과 연계용변압기의 역조류 현상에 의하여 계통에 악영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다.

Table 8. Characteristics of detection device for open phase fault in Y- Δ connection transformer

(a) Voltage characteristics

items		3-limb		5-limb/3-phase bank	
		PSCAD	test device	PSCAD	test device
voltage at primary side [V]	A-N	219	206	218	211
	B-N	220	218	220	218
	C-N	220	221	220	220
voltage at secondary side [V]	a-b	217	215	216	216
	b-c	222	223	222	221
	c-a	219	216	219	217

(b) Operation characteristics

items	3-limb						5-limb / 3-phase bank					
	PSCAD			test device			PSCAD			test device		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
operation slope	33.3	49.9	50.7	39.3	55.1	43.5	33.8	46.3	53.3	40.1	59.1	40.3
unbalanced load rate	79.1			87			83.4			80		
operation decision	operation			operation			operation			operation		

6. 결론

본 논문에서는 태양광전원이 연계된 배전선로의 단선 등으로 결상사고가 발생할 경우, 전류비교방식의 개념을 이용하는 새로운 방식의 결상사고 검출 알고리즘을 제안하며, 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 연계용변압기가 Y-Y 결선인 경우, 현장에서 많이 채용되고 있는 3각 철심구조에서는 결상된 상에 전압이 유기되어 본 연구에서 제안한 결상사고 검출 알고리즘에 따라 결상사고를 검출할 수 있음을 알 수 있었다.
- (2) 연계용변압기가 Y- Δ 결선인 경우, 철심구조와 관계없이 결상된 상에 전압을 유기하므로 기존에 사용되는 결상사고 보호방식(OPR, 47)으로 결상검출이 어려워, 제안한 결상사고 검출 알고리즘에 따라 결상사고를 검출해야 함을 알 수 있었다.
- (3) 단선사고로 인하여 계통에 악영향을 주는 문제점을 방지하기 위하여, 연계용변압기의 결선방식 및 철심구조에 따라 적절한 결상사고 보호장치가 채용되어야 함을 알 수 있었고, 본 논문에서 제시한 결상사고 보호장치의 검출 알고리즘이 유용함을 확인하였다.

References

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy, The third Energy Master Plan, 2019.
<https://www.etrans.or.kr/ebook/05/files/assets/comm/on/downloads/Third%20Energy%20Master%20Plan.pdf>
- [2] Byeong-Gi Kim, Jae-Beom Park, Kyeong-Sang You, Dae-Seok Rho, "Optimal Operation Methods of Protection Devices in Distribution Systems with PV Systems", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 60, No. 8, pp. 1485 ~ 1491, 2011.
 DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2011.60.8.1485>
- [3] Sung-Hun Park, Yong-Sik Lee, Sung-Won Jeong, Jae-Hyeon Gim, "Analysis of the Effect of the Grid-connected Photovoltaic System in Fault Case of Power System", Journal of The Korean Solar Energy Society, Vol.39, No.4, pp.69~77, 2019.
 DOI: <https://doi.org/10.7836/kses.2019.39.4.069>
- [4] K. B. Kim, H. K. Jung, Direction of R&D investment in electric power sector based on government's energy conversion policy, KISTEP Issue Weekly, Korea, Oct 2018.
- [5] Guideline for Interconnection of Distributed Generation System in Distribution Systems, KEPCO, 2012.
 DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2012.61.10.1536>
- [6] Kab-Seok Kang, Hu-Dong Lee, Dong-Hyun Tae · Dae-Seok Rho, "A Study on Open Phase Fault Characteristics of Interconnecting Transformer for PV System based on PSCAD/EMTDC", The Transactions P of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 69P, No. 2, pp. 225 ~ 234, 2020
 DOI : <https://doi.org/10.5370/KIEE.2020.69.2.225>
- [7] Dong-Yeol Shin, Dong-hyun Yun, Han-Ju Cha, "Problem Analysis by Iron Core Structure of the Transformer on Asymmetric three Phase lines and Prevention Measures", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 61, No. 10, pp. 1536 ~ 1541, 2012.
 DOI : <https://doi.org/10.5370/KIEE.2012.61.10.1536>
- [8] Dong-Yeol Shin, Bok-Nam Ha, Won-Wook Jung, Han-Ju Cha, "A Study on the Reverse-Power-Flow Phenomenon due to Transformer Wiring Types in Distribution System", The Korean Institute of Illuminating and electrical Installation Engineers, Vol. 22, No. 9, pp. 111~119, 2008.
 DOI : <https://doi.org/10.5207/JIEIE.2008.22.9.111>
- [9] Dong-Hyun Tae, Hu-Dong Lee, Byeong-Gill Han, Dae-Seok Rho. "A Study on Modeling of Ferro-resonance Characteristics with Saturation of Grid-connected Transformer in Energy Storage System", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, 70(1), 51-60, 2021.
 DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2021.70.1.051>
- [10] Dong-Yeol Shin, Dong-Hyun Yun, Han-Ju Cha, "The Development of an Algorithm for the Correction of Errors in the Phase Current of the Protective Relay on Distribution System Interconnected with Distributed Generation", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 62, No. 11, pp. 1604 ~ 1609, 2013.
 DOI: <http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2013.62.11.1604>
- [11] W. Enright, N. Watson, O.B.Nayak, "Three-phase Five-Limb Unified Magnetic Equivalent Circuit Transformer models for PSCAD V3", IPST '99 Proceedings, Budapest, pp.462-467, 1999.
https://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST1999/99IPST028.pdf

강 갑 석(Kab-Seok Kang)

[정회원]



- 2011년 8월 : 송실대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
- 2019년 2월 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과(박사수료)
- 1997년 6월 ~ 2017년 5월 : 한국폴리텍대학 스마트전기와 교수
- 2017년 6월 ~ 현재 : 한국폴리텍대학 스마트전기와 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전기안전, 전기설비

태 동 현(Dong-Hyun Tae)

[정회원]



- 2014년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2016년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로그리드

이 후 동(Hu-Dong Lee)

[정회원]



- 2016년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 9월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

<관심분야>

전력 및 배전계통, 신재생에너지, 전기저장장치

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[종신회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국 전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석