

분산전원 연계선로에서 보호계전기의 상전류 오차보정 알고리즘 개발

The Development of an Algorithm for the Correction of Errors in the Phase Current of the Protective Relay on Distribution System Interconnected with Distributed Generations

신 동 열[†] · 윤 동 현* · 차 한 주**
 (Dong-Yeol Shin · Donghyun Yun · HanJu Cha)

Abstract - When the ground fault on the power side occurs on distribution system interconnected with distributed generations, the abnormal current is generated in the neutral conductor by the connection type and the iron core structure of transformers for the interconnection of distributed power supplies due to the unbalanced voltage of the system, and subsequently the false operation of the protective relay on the load side occurs. Herein, this paper proposes the method to correct errors in the phase current to prevent the false operation of the protective relay by applying p-q theory and presents the simulation result of the error correction algorithm using PSCAD/EMTDC.

Key Words : p-q theory, Algorithm for the correction of errors in the phase current, Protective relay, Y-Y or Y-Δ connected transformer

1. 서 론

1.1 보호계전기 오동작 사례

최근 태양광발전, 풍력발전 등 분산전원 확대보급에 따라 연계용변압기의 결선방식(Y-Y 결선, Y-Δ 결선)과 철심의 구조(내철형, 외철형) 등 다양한 형태로 설치되고 있다.

분산전원 연계선로는 일반 수전변압기(Δ-Y결선)와 발전 변압기(Y-Δ결선)가 혼재되어 있고, 계통부하의 형태와 전원의 형태에 따라 다양한 형태의 연계용 변압기를 전력계통에 사용함에 따라 지락고장 또는 전원측 결상 등 계통고장시 3상 비대칭 전력이 발생되고, 연계용 변압기에 상별 불평형 전압이 공급되면 변압기의 2차 코일 또는 철심에 의해 순환 전류가 발생되고, 이로 인해 변압기의 1차 중성선에 이상전류가 발생되어 부하측 보호계전기가 오동작하게 된다[1].

그림 1의 F1 지점에서 c상 1선 지락고장이 발생하게 되면, 인근 선로인 분산전원연계선로에서는 발전고객의 연계용 변압기로 인해 중성선의 이상전류가 발생되고, 이로 인해 변전소 CB, 리클로자, 수용가측 OCR 계전기 가 오동작 한다 [2]. 선행 논문에서 중성선의 이상전류를 제한하는 방법으로 연계용 변압기 1차 중성점에 NGR 접지방식과 보호계전기 오동작을 방지하기 위한 방법으로 중성선 전류와 상전류의

크기를 비교하는 방식과 상별 역 조류의 방향을 비교해서 보호계전기 오동작 되지 않게 블로킹하는 방법을 선행논문에서 제시하였다[3].

본 논문에서는 p-q이론[4~7]을 적용하여 보호계전기 오동작 방지를 위한 방법으로 정량적으로 상전류 오차보정하는 방법과 PSCAD / EMTDC(Power system computer Aided Design/Electro-Magnetic Transient Design and Control)을 이용하여 오차보정 알고리즘 시뮬레이션 결과를 제시하고자 한다.

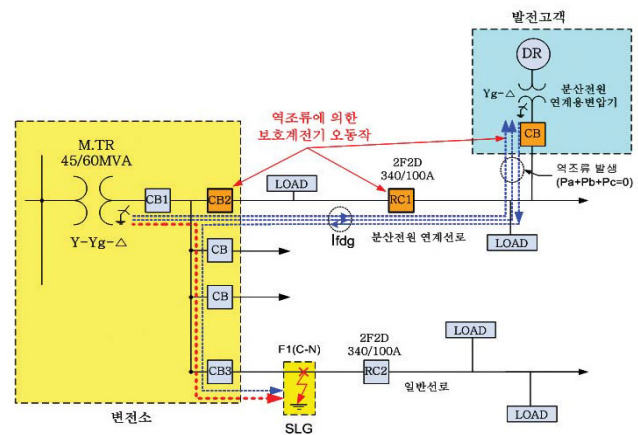


그림 1 분산전원에서 지락고장시 보호계전기 오동작
 Fig. 1 Protective relay malfunction by the ground fault on distributed generations

2. 본 론

2.1 중성선의 이상전류 분석

전원측 계통에서 고장발생시 부하측 연계용 변압기의 1차

[†] Corresponding Author : Korea Electric Power Research Institute

E-mail : sdy9199@kepeco.co.kr

* Candidate for the Ph.D, Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

** Professor, Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

Received : September 27, 2013; Accepted : October 17, 2013

측에서 이상전류가 발생하는 원인은 크게 두 가지 있다. 첫째 그림 2와 같이 변압기의 코일에 의한 전기적 특성과 둘째 그림 3과 같이 철심에 의한 자기적 특성에 의해 중성선에 이상전류가 발생된다.

그림 2와 같이 Y-Δ결선방식을 사용하는 연계용 변압기는 전원측 c상에 지락고장시 c상의 전압이 떨어지고, 나머지 a, b상 전압은 정상적으로 공급한다. 이때, 변압기 1차 입력은 a, b, n상의 2상3선 형태로 역 V결선 공급되고, 변압기 2차측 Δ결선에 의해 3상3선으로 a, b, c상 전압이 유기되고, 2차측 c상에 의해서 역으로 1차 측으로 역 조류를 공급하여 계통에서 떨어진 전압만큼 보상하게 된다. 이때 변압기 2차측 Δ결선에 의해서 상별 전류가 직렬로 순환전류가 발생되면서 중성선 전류는 상전류의 약 3배가 발생되어 보호계전기 등이 오동작한다.

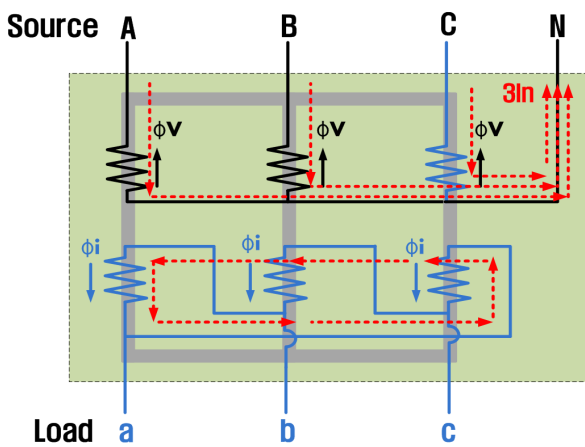


그림 2 변압기 결선방식에 의한 역 조류 현상
Fig. 2 Reverse power-flow by the connected method of the transformer

그림 3과 같이 Y-Y결선방식에서 내철형 철심구조에 c상 지락고장시 a상과 b상은 정상적으로 전원을 공급하고 있기 때문에 철심에 의해 a상과 b상의 자속이 합산되어 c상을 역

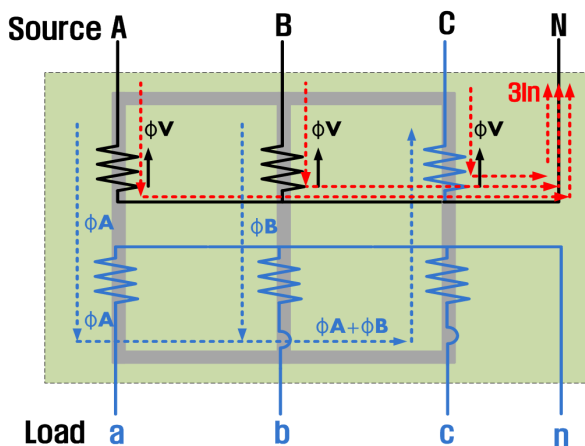


그림 3 변압기 철심구조에 의한 역 조류 현상
Fig. 3 Reverse power-flow by the iron structure of the transformer

으로 공급하게 되고, 이때 c상 역 자속에 의해 c상 코일에 전압이 유기된다. 이때 중성선의 전류는 상별 동위상이 되면서 상전류의 약 3배가 발생되어 보호계전기가 오동작 되는 것으로 분석되었다.

2.2 보호계전기 상전류 측정위치 및 구성

그림 4와 같이 전원측에서 지락고장, 단선 등 계통고장시 부하측 중성선의 이상전류로 보호계전기가 오동작 된다. 연계용 변압기 2차측은 Δ결선이 되어 있기 때문에 영상분이 없다. 따라서 중성선의 이상전류는 고객 보호계전기 설치점 이후 고장과는 무관하게 전원측 고장에 의해 오동작 된다. 즉 이를 방지하기 위해 pt와 ct에서 측정된 전압과 전류를 이용해서 계통에 의해 발생된 중성선의 이상전류(in)을 필터링하고, 보호계전기에서 상별 보정된 상전류를 공급시 역 조류에 의한 보호계전기의 오동작을 방지할 수 있다.

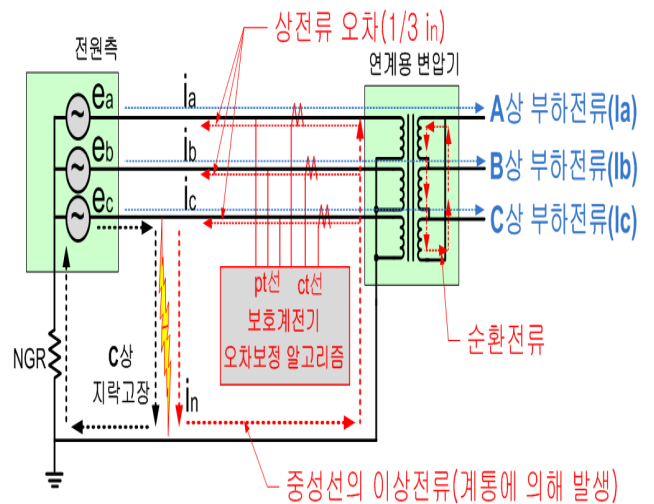


그림 4 보호계전기의 오차보정 개념도
Fig. 4 The schematic diagram for the correction of errors in the protective relay

2.3 상전류 오차보정 순서도

그림 5와 같이 상전류 오차보정 방법에 대한 개념도로 p-q이론을 적용하여 pt와 ct에서 측정된 전압과 전류를 α - β -0 좌표변환하고, 순시전력($P_{\alpha\beta}$, $Q_{\alpha\beta}$)을 계산하고, 중성선의 이상전류를 제거(i_a , I_{β})하고, 다시 a-b-c 좌표변환하여 상별 보정후 전류(I_a , I_b , I_c)를 기존 보호계전기 알고리즘에 적용하는 방법이다.

2.4 상전류 오차보정 알고리즘

그림 6은 계통측(한전측) 지락고장시, 중성선의 이상전류에 의해 보호계전기 오동작을 방지하기 위해서 고객측 연계용 변압기의 1차측에 보호계전기의 오동작 방지 알고리즘을 개발하여 PSCAD / EMTDC 전자기해석 소프트웨어를 이용하여 상전류 오차보정 알고리즘을 적용하였다.

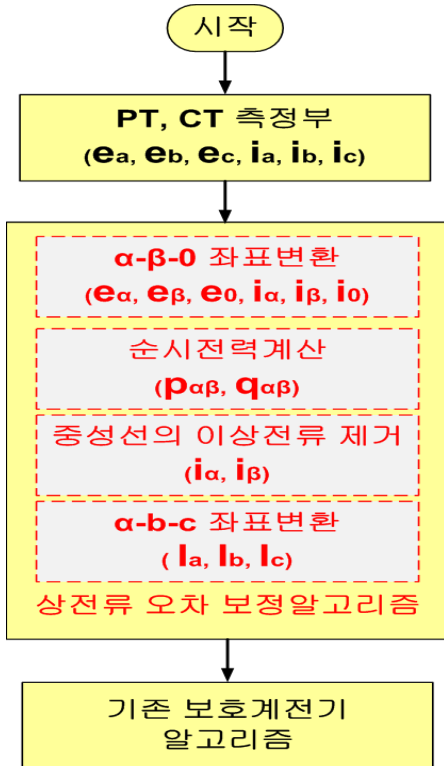


그림 5 상전류 오차보정 순서도
 Fig. 5 The flow chart for the correction of errors in the phase current

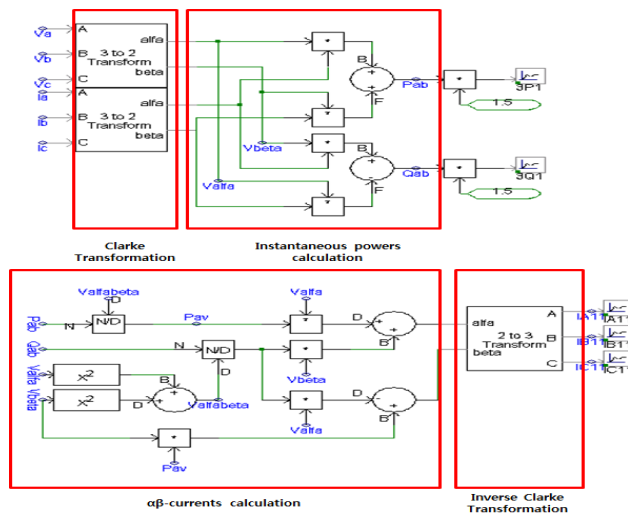


그림 6 보호계전기의 상전류 오차보정 알고리즘
 Fig. 6 The algorithm for the correction of errors in the phase current of protection relay

상기 알고리즘은 그림 5와 같은 순서도에 의해 구성되었으며, pt 및 ct에서 측정된 3상 전압 및 전류($V_a, V_b, V_c, I_a, I_b, I_c$)를 α - β 좌표로 변환하는 식은 (1)~(2)와 같다. 참고적으로 a-b-c 좌표에서의 전압과 전류는 pt에서 측정된 전압 및 전류와 동일하다.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

그림 6에서 중성선의 이상전류를 제거하기 위해서, 3상 전압을 측정하였다. 그 이유는 변압기의 결선방식과 철심구조에 의해 중성선의 이상전류가 발생되는데, 근본적인 이유는 상별 불평형 전압(영상전압)이 발생되기 때문이다. 또한, 계통측 지락고장시 중성선의 이상전류는 상전류의 3배가 발생되고, 이때 상과 상사이 발생되는 순환전력을 제거하기 위해서 p-q이론을 적용하여 고장시 중성선의 이상전류를 제거하였다. p-q 이론에 의해 Clarke transformation의 출력을 instantaneous power calculation에서 입력으로 받아 얻어낸 순시유효전력(P_{ab})과 순시무효전력(Q_{ab})은 식(3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

식(3)에서 순시유효전력과 순시무효전력을 α - β 좌표로 역 변환하면 식(4)와 같고,

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(4)의 α - β 좌표에 대한 순시전류는 $\alpha\beta$ -current calculation에서 식(5)의 순시무효전류와 순시유효전류로 나뉜다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, α 축 순시유효 전류: $i_{\alpha p} = \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p$
 α 축 순시 무효 전류: $i_{\alpha q} = \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q$
 β 축 순시 유효 전류: $i_{\beta p} = \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p$
 β 축 순시무효 전류: $i_{\beta q} = \frac{-v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q$

즉, 계통의 중성선에서 지락고장 발생시, 지락고장 지점에서 전압 강하가 발생되고, 중성선의 이상전류는 전압강하에 의해 발생된다. 그림 6의 clarke transformation에서 지락고장시 측정된 전압과 전류가 계산되어 v_α 와 v_β 로 출력되는데 v_α 는 지락고장에 의해 전압강하가 발생된다. 이에 instantaneous

power calculation에서 출력되는 유효전력과 무효전력은 전압강하의 영향을 받게 되고, $\alpha\beta$ -current calculation에서 상과상 사이 발생하는 순환전력은 $\frac{v_\beta}{v_\alpha^2+v_\beta^2}q + \frac{-v_\alpha}{v_\alpha^2+v_\beta^2}q=0$ 에 의해 상쇄되어 중성선의 이상전류만 제거된다.

$\alpha\beta$ -0 좌표에서 순시전력은 식(6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} p_\alpha \\ p_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha i_\alpha \\ v_\beta i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha i_{\alpha p} \\ v_\beta i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\alpha i_{\alpha q} \\ v_\beta i_{\beta q} \end{bmatrix} \quad (6)$$

발전 고객측에서 발생하는 순시전력은 식(5)와 식(6)을 이용하여 식(7)의 관계가 성립된다.

$$p = p_\alpha + p_\beta = \frac{v_\alpha^2}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} p + \frac{v_\beta^2}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} p + \frac{v_\alpha v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q + \frac{-v_\alpha v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q \quad (7)$$

식(7)에서 $\frac{v_\alpha v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q + \frac{-v_\alpha v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q = 0$ 이며, 식(6)과 식(7)에 의해 식(8)과 식(9)가 얻어진다.

$$p = v_\alpha i_{\alpha p} + v_\beta i_{\beta p} \equiv p_{\alpha p} + p_{\beta p} \quad (8)$$

$$0 = v_\alpha i_{\alpha q} + v_\beta i_{\beta q} \equiv p_{\alpha q} + p_{\beta q} \quad (9)$$

여기서,

$$\alpha\text{축 순시 유효 전력: } p_{\alpha p} = \frac{v_\alpha^2}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p$$

$$\alpha\text{축 순시 무효 전력: } p_{\alpha q} = \frac{v_\alpha v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q$$

$$\beta\text{축 순시 유효 전력: } p_{\beta p} = \frac{v_\beta^2}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p$$

$$\beta\text{축 순시 무효 전력: } p_{\beta q} = \frac{-v_\alpha v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q$$

본 논문에서 제안한 오차보정 알고리즘의 핵심은 중성선의 이상전류에 의한 상전류의 오차를 보상하기 위한 것이다. 이에, $\alpha\beta$ -0 좌표에서 식(4)에서 순시보상전류는 식(10)과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ -q \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서,

$i_{C\alpha}$: α 축 보상전류

$i_{C\beta}$: β 축 보상전류

이에, 그림 6의 보상전 상별 전류는 식(1)~식(9)에 의해 $\alpha\beta$ 좌표에서 순시유효전력과 순시무효전력 계산 그리고 중성선의 이상전류 제거 후 a-b-c 좌표 변환하여 최종 보정후

상별전류를 수식으로 증명하였다. 즉, 측정된 전압과 전류를 $\alpha\beta$ -0좌표로 변환하여 식(1~3)을 이용하여 순시전력을 계산하였고, 다음 식(4~9)에서 상별 불평형 전압을 이용해서 상과 상사이 발생하는 순환전력을 제거함으로써 중성선의 이상전류를 제거하였다. 중성선의 이상전류가 제거된 순시보상전류 식(10)을 식(11)에 대입하여 $\alpha\beta$ -0 좌표에서 a-b-c 좌표로 변환하여 최종적으로 보호계전기의 상전류 오차보정값으로 적용하였다.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \end{bmatrix} \quad (11)$$

2.4.3 PSCAD/ EMTDC로 알고리즘 시뮬레이션 결과

그림 7은 분산전원 연계선로에서 전원측 지락고장시 부하측 오동작현상을 모의하였으며, 앞에서 이론적 해석한 변압기 상전류 오차 보정방법을 검증하기 위해서, PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 이용하여 분산전원 발전고객(연계용 변압기 1차측)측에 보호계전기 오차보정 알고리즘을 적용하여 결과를 시뮬레이션 하였다. 분산전원 연계선로 말단에 태양광 발전소(1000KW)에 연계용 변압기의 결선방식이 Y- Δ 결선 형태로 구성되어 있고, 전원측에서 C상 지락고장이 발생할 때, 계통에 의해 발생하는 중성선의 이상전류로 상별 전류의 크기가 부하전류와 합산되면서 증가 또는 감소하는 현상이 발생되고, 이로 인한 보호계전기 오동작 상황을 시뮬레이션 하였다. 태양광 발전소 연계용 변압기의 제원은 표 1과 같다.

표 1 연계용 변압기 제원

Table 1 The specifications of the transformer

구분	규격
전압비[kV]	22.9 / 0.38
용량	1MVA
%임피던스[pu]	0.04(4%)
철손[pu]	0.002(2kW)
동손[pu]	0.01(10kW)

그림 8은 태양광 발전고객 연계용변압기 1차측에서 측정된 상별전류 및 중성선의 전류이다. 정상상태에서 시뮬레이션한 결과파형으로, 상전류 보정전(IA11, IB1, IC1), 상전류 보정후(IA11, IB11, IC11), 고장시 이상전류(IA111, IB111, IC111, IN111), 계통고장전류(Ia-F, Ib-F, Ic-F)를 각각 모의하였으며, 상전류 보정전의 전류는 현재 보호계전기에서 사용하는 전류로 계통측 고장시 이상전류가 포함되는 전류이다. 상전류 보정후 전류는 계통고장시, 중성선의 이상전류를 제거한 전류이다. 정상적인 상태(고장이 없을 때)에서는 중성선의 이상전류가 발생되지 않으며, 이때 상별전류는 25A(RMS)로 보정전과 보정후의 전류의 크기는 동일하다.

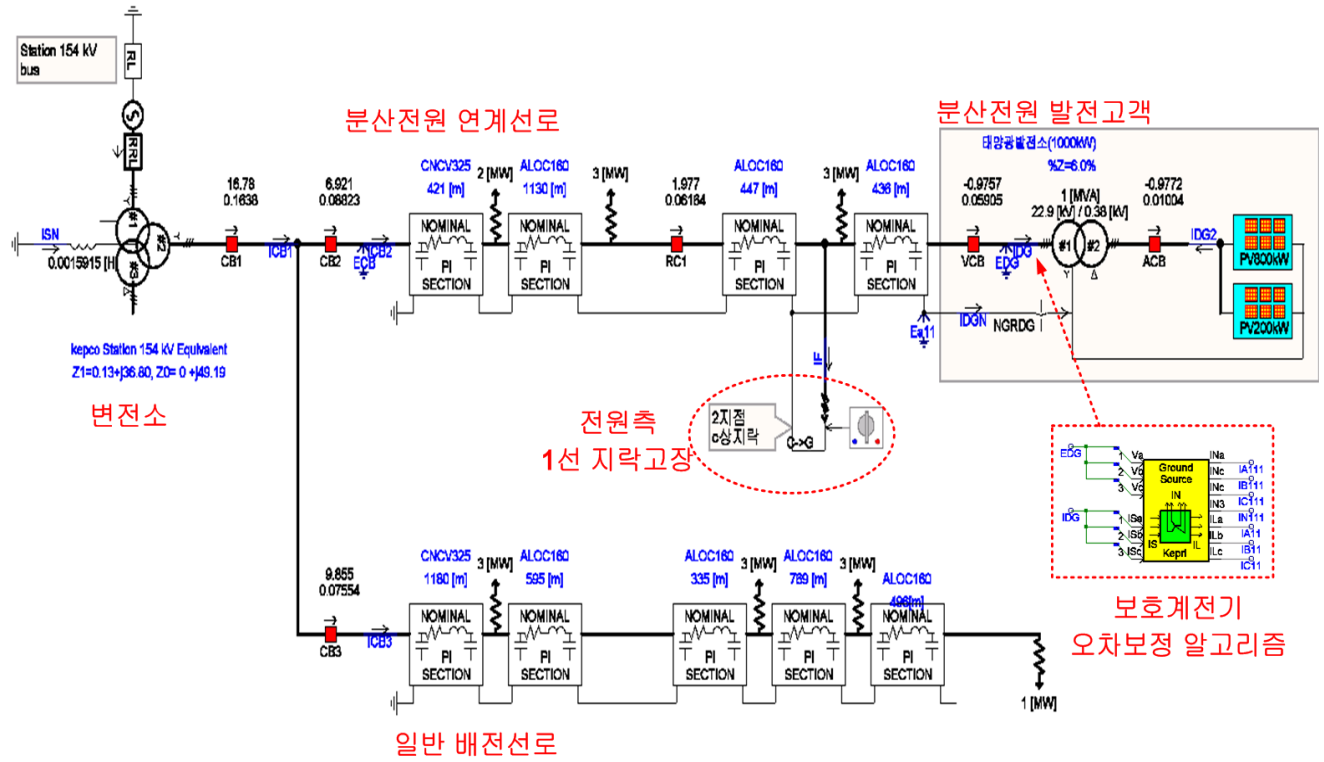


그림 7 PSCAD/EMTDC를 이용한 보호계전기의 상전류 오차보정 계통도

Fig. 7 The distribution diagram for the correction of errors in the phase current of protective relay using the PSCAD/EMTDC

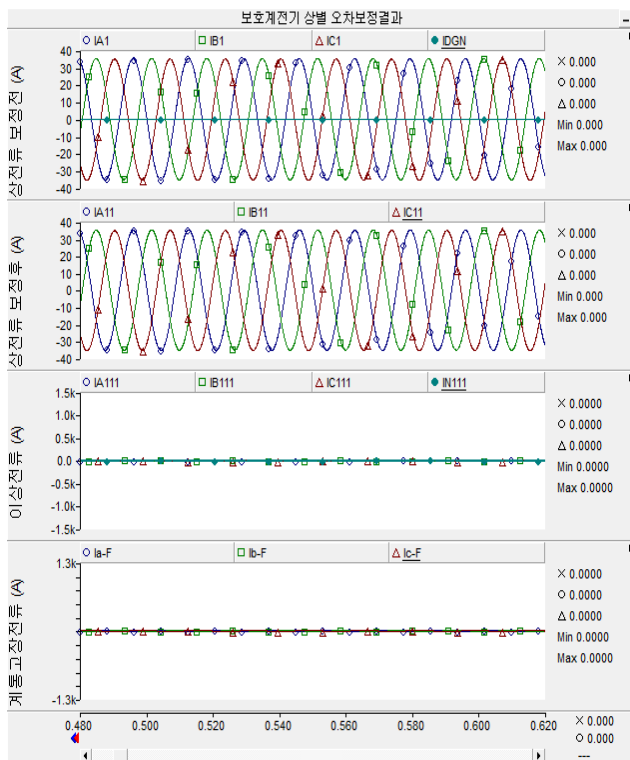


그림 8 정상시 상전류 오차보정 전, 후 비교

Fig. 8 Comparison of before vs after on the correction of errors in the phase current at the normal

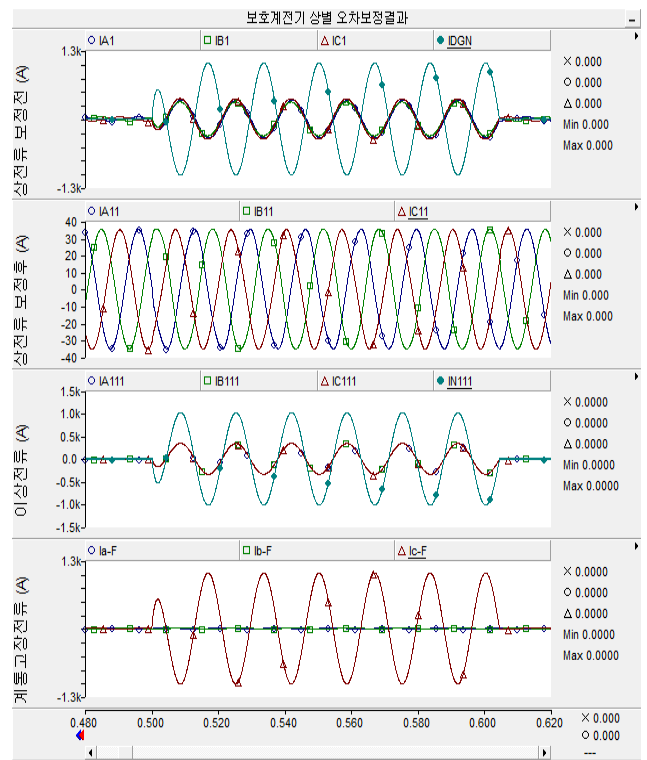


그림 9 지락 고장시 상전류 오차보정 전, 후 비교

Fig. 9 Comparison of before vs after on the correction of errors in the phase current at the ground faults

그림 9는 고장상태에서 시뮬레이션한 결과파형이다. 그림 7에서 C상 지락고장이 발생되었고, 이때 발전 고객측에서 측정된 상별 전류이다. 정상적인 상태에서는 상전류의 값이 25A(RMS)가 발생되지만, 전원계통측 지락고장시 보정전 상별전류는 약 300A 이상 고장전류가 발생되며, 이때 중성선의 전류는 상별전류의 약 3배인 900A가 발생되어, 이상전류를 미보상시 보호계전기가 오동작하는 것으로 분석되었다. 그러나 상전류 보정후의 전류는 중성선 발생되는 이상전류를 보상하기 때문에 상별 전류는 고장전과 고장후 모두 RMS값으로 25A로 측정되어, 전원측 지락고장시에 보호계전기의 오동작을 방지할 수 있었다.

3. 결 론

우리나라 분산전원 연계용 변압기는 분산전원 계통연계 기준에 따라 변압기 1차측 중성점을 반드시 접지하도록 규정되어 있다. 따라서 분산전원 연계용 변압기는 Y-Y결선방식과 Y-Δ결선방식으로 주로 사용하며, 전원측에서 지락고장이나 전원선이 결상되었을 경우, 역 조류나 순시무효전력에 의해 보호계전기가 오동작하거나 변압기가 소손되는 사례가 있었고, 역 조류 및 중성선 이상전류 발생 원인이 변압기의 코일의 결선과 철심의 형태에 의한 전자기적 특성에 의해 발생하는 것으로 선행 논문에서 입증하였다.

본 논문에서는 p-q이론을 적용하여 중성선의 이상전류를 필터링하여 상전류의 오차를 보정하는 방법을 이론적으로 제시하였으며, 시뮬레이션을 통해 알고리즘을 검증하였다.

상전류 오차보정방법은 향후 보호계전기 오동작 방지 알고리즘과 전력량계 과부족 계량오차 보정알고리즘에 적용 가능하다. 특히 상기 알고리즘은 분산전원용 발전고객용 보호계전기만 뿐만 아니라, 변전소의 CB, 배전선로용 보호장치에 적용 활용할 수 있도록 제도적 방안이 필요하다. 또한 전력량계의 부품오차와 무관하게 계통에서 발생하는 중성선의 이상전류로 인한 계량오차를 보정하기 위한 알고리즘에 반영한다면 시너지 효과가 클 것으로 기대된다.

References

[1] Dong-Yeol Shin, Donghyun Yun, HanJu 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

[2] Dong-Yeol Shin, Yong-woo Park, HanJu Cha " A Case Study on Malfunction of OCGR and Inaccuracy of Watt-hour Meter in Distributed Generation System", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol.57, No.8, pp.1349~1355, 2008

[3] Dongyeol Shin, Dongmyung Kim, HanJu Cha, "An Overcurrent Analysis in Neutral Line and Algorithm to Prevent Malfunction of Relay in Distributed

Generations", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.58, No.10, pp. 1916~1922, 2009

[4] H.Akagi, Y. kanazawa, A. nabaе, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components", 1984 IEEE, pp.625-630

[5] M.gao, S.yang, C. jin, Z. ren, M. chen, Z. qian, "Analysis and experimental validation for power calculation based on p-q theory in single-phase wireless-parallel inverters", 2011 IEEE, pp.620-624

[6] Leszek S. Czarnecki, "On some misinterpretations of the instantaneous reactive power p-q theory", 2004 IEEE, pp.828-836

[7] Leszek S. Czarnecki, "Instantaneous reactive power p-q theory and power properties of three-phase systems", 2006 IEEE, pp.362-367

저 자 소 개



신 동 열 (申 東 烈)

1966년 4월 15일생. 충남대학교 전기공학과 석사졸업. 1992년 ~2006년 한전 부산지사 근무. 2006년~현재 한전 전력연구원 배전연구소 근무, 2005년 특허분야 정부 신지식인 선정, 2006년 이달의 엔지니어상 수상

Tel : 042-865-5966,

E-mail : sdy9199@kepcoco.kr



윤 동 현 (尹 棟 鉉)

1975년 7월 27일생. 2004년 충남대학교 전자공학과 석사졸업, 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정, 2007년~2011년 국방과학연구소 선임연구원

Tel : 042-935-8547

E-mail : dhyun7585@gmail.com



차 한 주 (車 翰 周)

1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 포항공대 전자전기공학과 석사졸업, 2004년 미국 Texas A&M University, College station(공학박사), 1990년~2001년 LG산전 연구소 책임연구원, 2005년 ~현재 충남대학교 전기공학과 부교수.