ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 67, No. 12, pp. 1705~1710, 2018
http://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.12.1705

분산전원 연계 계통에서의 과전류계전기 오동작에 관한 연구

A Study on the Over Current Relay Misoperation in Power System with Distributed Generations

박 종 일* · 이 계 병* · 박 창 현†
(Jong-Il Park · Kyebyung Lee · Chang-Hyun Park)

Abstract - This paper deals with an analysis of the causes of over current relay(OCR) misoperation in power system with distributed generations(DG). In general, Y-D and Y-Y-D transformer connections are used for grid interconnection of DG. According to the interconnection guideline, the neutral point on Y side should be grounded. However, these transformer connections can lead to OCR misoperation as well as over current ground relay(OCGR) misoperation. Several researches have addressed the OCGR misoperation due to the interaction between transformer connections and zero-sequence voltage of distribution system. Recently, a misoperation of OCR at the point of DG interconnection to the utility system has been also reported. With increasing the interconnections of DG, such OCR as well as OCGR misoperations are expected to increase. In this paper, PSCAD/EMTDC modeling including DG interconnection transformer was performed and various case studies was carried out for identifying the cause of OCR misoperation.

Key Words : Over current ground relay(OCGR), Over current relay(OCR), Voltage unbalance, Yg-Yg-D transformer, Zero-sequence harmonic

1. 서 론

우리나라는 22.9 kV 공통 중성선 다중접지 3상 4선식 방식을 채택하고 있다. 3상 4선식 배전계통은 단상 및 3상 부하 모두에 전력을 공급할 수 있지만, 계통 불평형이 심해질수록 손실 증가 및 기기의 출력 저하 등 다양한 문제가 발생할 수 있다[1-2]. 계통의 불평형은 주로 부하 불평형에 의해 발생한다. 부하측 전류 불평형 및 고조파는 전원측 전류 불평형으로 이어져 공급 계통의 전압 불평형을 야기하게 된다 [3]. 부하측의 설비 불평형을 제한하기 위해 내선규정에서는 중성선과 각 전압 선간의 부하 불평형률을 일정범위 이내로 설계하도록 제안하고 있다[4]. 한편, 정책적인 신재생에너지 확대로 인해 다양한 분산전원의 계통 연계가 늘어나고 있다. 분산전원 연계 지침에 따르면 연계 변압기 결선으로 Yg-D 또는 Yg-Yg-D방식을 채택하고 있다 [5]. 연계 변압기의 D결선은 안정권선으로 분산전원 및 부하에 의한 고조파의 계통 유입을 방지하기 위함이다. 그러나 전원측이 접지된 연계 변압기 결선으로 인해 계통에서 다양한 문제가 발생하고 있다. 전원측에 영상 전압이 존재할시 Yg-D 및 Yg-Yg-D 연계 변압기의 영상 회로 특성으로 인해 큰 영상 전류가 발생하여 지락과전류계전기(OCGR) 오동작 및 계통 손실 유발 등의 문제를 야기하고 있다. 이와 관련한 사례 연구와 분석이 몇몇 소개되었다[5-6]. 공급 계통의 영상 전압이 규정 범위 내로 유지가 되고 있음에도 등가 영상회로의 낮은 임피던스로 인해 큰 영상 전류를 유발하게 된다. 특히 공급 계통의 영상분 고조파도 해당 문제의 주요한 유발요인이 된다. 앞으로 비선형 부하의 증가로 인해 계통내 고조파 유입이 더욱 증가할 것으로 예상되고 신재생에너지의 계통 연계도 증가할 것으로 예상되어 해당 문제에 대한 효과적인 대책 수립이 필요하다. 그뿐만 아니라 최근에는 Yg-Yg-D 연계 변압기 계통에서 1차측 과전류계전기(OCR)의 오동작으로 인한 피해가 보고되었다. 부하측 설비 불평형률 및 전류 불평형은 내선규정에서 제한하는 범위 이내로 운전되고 있었음에도 변압기 1차측 특정 상의 과전류계전기가 오동작하였다. 이에 본 논문에서는 분산전원 연계 계통에서 계통 영상 전압으로 인한 과전류계전기 오동작의 원인 규명과 분석을 실시하였다. 실측 데이터에 기반하여 분산전원 연계 계통에 대한 전자기 과도 해석 모델링을 수행하였고 다양한 전원 전압 및 부하 조건에 따른 모의 분석을 실시하였다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University, Korea
E-mail : spch@pknu.ac.kr
* Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University, Korea
Received : October 26, 2018; Accepted : November 23, 2018

2. 분산전원 연계 변압기와 과전류계전기 오동작

신재생에너지를 포함한 분산전원의 계통 연계시 연계 변압기의 결선은 일반적인 수전 변압기와 달리 Yg-D 또는 Yg-Yg-D 결선을 채택하고 있다. 이러한 조건에서 계통측 전압이 완전 평

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

형을 유지할 경우는 문제가 없으나 불평형 및 고조파로 인한 영상 전압이 존재할 경우 다양한 문제를 유발하게 된다. 실제 해당 변압기 결선을 사용하는 수용가들에서 영상 전류 확대로 인한 OCGR 오동작 사례가 보고되고 있다. 이러한 영상 전류는 델타 결선의 순환전류 및 중성선 전류로 나타나 추가적인 손실까지 발생시킨다. 그뿐만 아니라 연계 변압기의 특성과 계통의 영상 전압에 의해 OCR 동작에도 영향을 미친다. 실제 연계 계통에서 2차측 부하가 평형 상태로 과부하 없이 동작 중임에도 1차측의 특정 상에 과전류가 발생해 OCR이 동작한 사례가 있었다. 본 논문에서는 분산전원 연계 계통에서의 OCR 오동작 원인 및 발생원리를 규명하였다.

2.1 변압기 결선과 영상 등가회로

일반적으로 계통에서의 영상 전압은 각 상전압의 불평형 및 영상분 고조파에 의해 발생한다. 대칭 성분법에 따른 각 상전압과 영상 전압의 관계는 식 (1)과 같다. 각 상전압이 평형 조건일 때 영상 전압은 나타나지 않으나 전압의 크기나 위상의 불평형 조건에 따라 영상분 전압이 발생한다.

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_A + V_B + V_C) \tag{1}$$

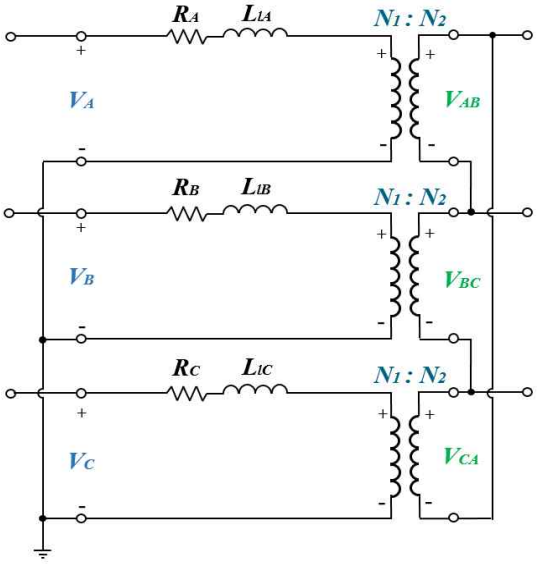


그림 1 3상 Yg-D 결선 변압기
Fig. 1 3-phase Yg-D winding transformer

그림 1은 Yg-D결선 변압기의 등가회로를 나타낸다. 해당 등가회로에서 변압기 1차측 각 상전압은 식 (2)~(4)와 같다. 여기서, 1차측 여자회로는 무시한 것이며, $R_A \approx R_B \approx R_C \approx 0$, $X_{lA} = X_{lB} = X_{lC} = X_l$이다.

$$V_A = jX_l I_A^o + \frac{n_1}{n_2} V_{ab} \tag{2}$$

$$V_B = jX_l I_B^o + \frac{n_1}{n_2} V_{bc} \tag{3}$$

$$V_C = jX_l I_C^o + \frac{n_1}{n_2} V_{ca} \tag{4}$$

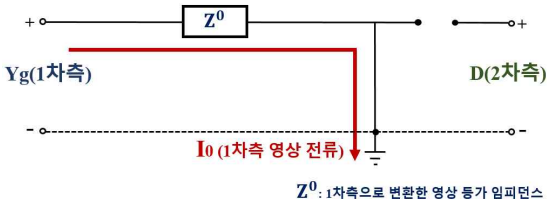
식 (2)~(4)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 영상 전압은 다음과 같다.

$$V^0 = \frac{1}{3}\left\{jX_l(I_A^o + I_B^o + I_C^o) + \frac{n_1}{n_2}(V_{ab} + V_{bc} + V_{ca})\right\} \tag{5}$$

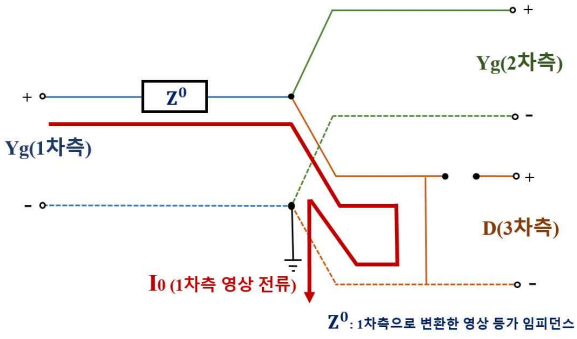
여기서 $I_A^0 = I_B^0 = I_C^0 = I^0$이고 D결선 2차측 전압은 $V_{ab} + V_{bc} + V_{ca} = 0$이다. 따라서 영상 전압과 전류의 관계는 식 (6)과 같다.

$$V^0 = jX_l I^0 = Z^0 I^0 \tag{6}$$

상기의 관계로부터 Yg-D 및 Yg-Yg-D 결선의 영상 등가회로는 그림 2와 같다 [7-8].



(a) Yg-D 결선



(b) Yg-Yg-D 결선

그림 2 변압기 영상 등가회로
Fig. 2 Transformer Zero-sequence equivalent circuit

Yg-D 및 Yg-Yg-D 연계 변압기는 계통측의 접지와 델타 권선의 순환 루프로 인해 2차측이 개방이어도 영상 전류가 흐르는 경로를 가진다. 영상분 임피던스(Z^0)가 작을 경우 전원측 영상 전압이 규정 범위내로 유지가 되어도 큰 영상 전류가 흐를 수 있다.

2.2 전압 불평형에 따른 영상 전압과 OCR 계전기 오동작

계통 영상 전압의 주요 원인은 전압의 불평형과 영상분 고조파이다. 각 원인에 따라 영상 전류가 상전류에 미치는 영향은 다르게 나타난다. 영상분 고조파로 인한 영상 전압의 경우 평형 조건에서 A, B, C 각 상전류의 크기를 동일하게 증가시키는 효과를 나타낸다. 또한, 해당 영상 전류는 중성점에서 중첩되어 중성선 전류를 증가시켜 OCGR 오동작의 주요 요인이 된다. 반면 불평형으로 인한 영상 전압의 경우 영상 전류 자체는 각 상에 동일한 크기와 위상의 벡터로 나타나지만, 정상분과 역상분과의 관계에 따라 각 상전류에 미치는 영향이 달라진다. 즉, 각 상전류는 정상, 역상, 영상 전류의 합으로 나타나지만 불평형에 따라 정상분과 역상분 합 벡터의 크기와 위상이 서로 상이할 경우 영상분 전류로 인해 특정 상의 전류는 증가되고 특정 상의 전류는 감소하게 된다. 따라서 부하가 평형 상태이더라도, 불평형으로 인한 영상전압이 클 경우 큰 영상 전류가 흐르게 되고 각 상의 전류 편차를 크게 만들게 된다. 그림 3은 영상분 고조파가 존재할 경우의 전압과 전류의 예이다. 3상 평형 조건에서 각 상에 영상분 고조파 전압이 존재할 경우 해당 전압에 따른 영상분 전류가 각 상에 동일하게 증가한다. 반면 전압의 불평형이 존재할 경우 전압과 전류의 관계는 그림 4와 같다. 불평형에 따른 영상전압이 존재할시 Yg-D 및 Yg-Yg-D 변압기에서는 영상전류가 크게 확대되기 때문에 1차측 전류 불평형을 더욱 증가시키게 된다. 그림 4의 예에서 영상 전류로 인해 A상 전류의 크기는 증가하고 B, C 상의 전류 크기는 줄어드는 결과가 나타난다.

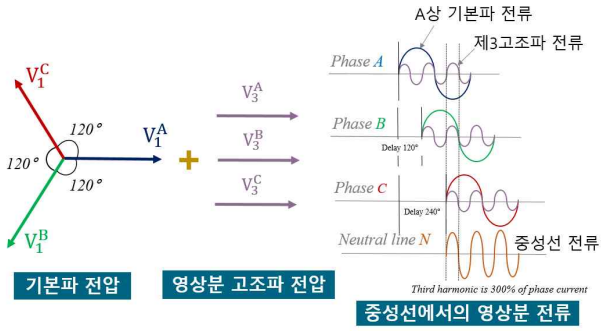


그림 3 영상분 고조파 전압과 전류
Fig. 3 Zero sequence harmonic voltage and current

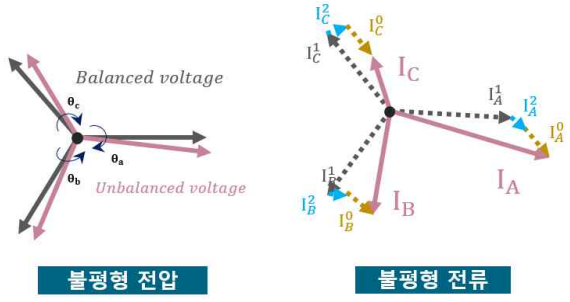


그림 4 불평형 전압에 의한 불평형 전류
Fig. 4 Unbalanced current due to unbalanced voltage

실제 배전 계통에서는 어느 정도의 불평형과 고조파가 함께 존재한다. 두 원인 모두 영상 전류의 크기를 증가시키게 되지만 불평형이 존재할 경우에는 크기뿐 아니라 각 상전류간의 편차를 증가시키는 결과를 가져온다. 상전류간의 차이가 커짐에 따라 특정상에 과전류가 발생할 수 있다. 그림 5는 현장에서 실제 측정된 Yg-Yg-D 연계 변압기 1차측 전류 벡터도이다. 2차측 부하 전류는 거의 평형 상태였으나 1차측의 전류는 불평형이 매우 심하게 나타났다. B상의 전류가 크게 증가하고 A, C상의 전류는 줄어드는 결과가 나타났다.

$$I^0 = 2.29 \angle 224.6^\circ\,[\mathrm{A}] \quad I_A = 7.21 \angle -11.01^\circ\,[\mathrm{A}]$$
$$I^+ = 9.59 \angle -2.68^\circ\,[\mathrm{A}] \quad I_B = 12.82 \angle -122.8^\circ\,[\mathrm{A}]$$
$$I^- = 1.09 \angle 141.9^\circ\,[\mathrm{A}] \quad I_C = 8.87 \angle 124.4^\circ\,[\mathrm{A}]$$

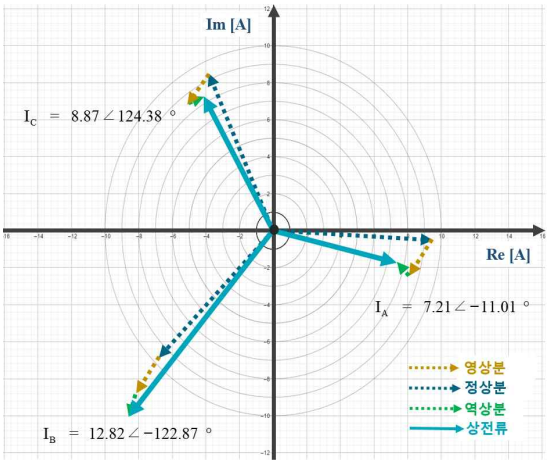


그림 5 측정 전류에 대한 시퀀스 벡터
Fig. 5 Sequence vectors of the measured current

3. 계통 모델링 및 사례 분석

3.1 분산전원 연계 계통 모델링

분산전원 연계 계통에서의 OCR 오동작 원인을 분석하기 위해 PSCAD/EMTDC 모델링을 수행하였다. 먼저 전원의 경우 다양한 불평형 및 고조파를 반영할 수 있도록 구성하였다. 또한 Yg-Yg-D 연계 수용가의 계통측 실측 전압을 모의에 반영할 수 있도록 데이터 import 모듈을 구성하였다. PSCAD/EMTDC의 master library의 File Reader 모듈을 사용하여 실측 전압을 반영할 수 있도록 하였다(그림 6).

Yg-Yg-D 변압기는 변압기 제조사에서 제공하는 시험성적서를 바탕으로 모델링을 하였다. 주요 변압기 데이터는 표 1과 같다. 부하는 내선규정에서 제한하는 범위 내의 다양한 평형 및 불평형 조건을 반영할 수 있도록 모델링 하였다. 전원을 비롯해 연계 변압기, 부하 등을 포함한 전체 모의 계통은 그림 7과 같다.

표 1 변압기 데이터
Table 1 Transformer data

Transformer Data	Rat. Capacity	400 kVA
	Rat. Voltage	22.9/0.38/0.38 kV
	Winding type	Yg-Yg-D
	No load losses	0.0028 p.u.
	Copper losses	0.0103 p.u.
	%impedance voltage	6.16 %

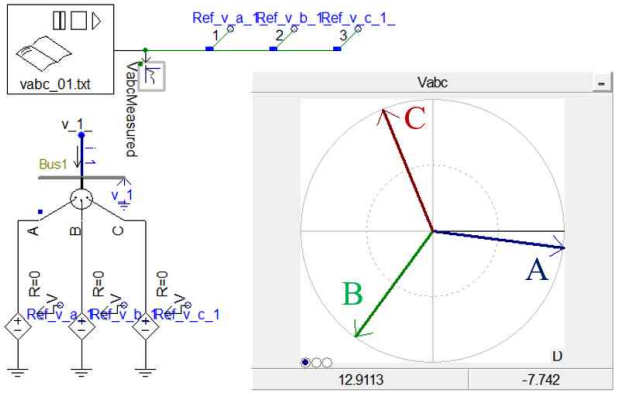


그림 6 PSCAD/EMTDC 전원 모델링
Fig. 6 Power supply modeling using PSCAD / EMTDC

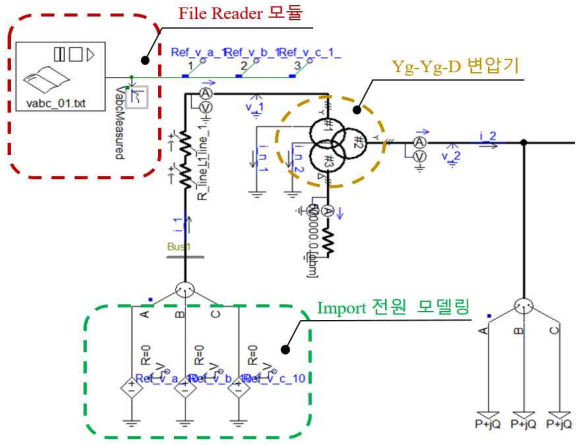


그림 7 실측 데이터 기반한 모의 계통도
Fig. 7 Simulation system based on the measured data

3.2 영상분 고조파에 따른 전류 변화

고조파에 의한 영상 전류와 불평형에 의한 영상 전류의 영향을 비교 분석하였다. 먼저 기본파와 3고조파 전압을 포함한 전압원에 대해 3상 평형 부하 조건에서의 영상 전류를 분석하였다. 3고조파 영상 전압과 변압기의 영상 임피던스에 대응되는 영상 전류가 발생하였다. 각 상 전류는 기본파 평형 전류에 동일한 크기의 영상전류가 합성된 형태로 나타났고 해당 영상전류는 변압기 1차측 중성점에서 중첩되어 중성선에 흘렀다. 영상분 고조파로 인한 영상전류는 각 상전류의 크기를 동일하게 증가시키고 중성선 전류로 합성됨을 확인하였다. 표 2는 고조파 영상 전압의 크기에 따른 전류 변화를 보여준다. 영상 전압의 크기가 커질수록 상 전류도 증가하고 중성선 전류도 증가하였다. 그러나 1차측 전류의 불평형은 나타나지 않았다. 일반적으로 OCGR 정정치는 정격전류의 30 % 정도이다. 해당 변압기 1차측 정격전류가 10 A 정도이므로 약 3 A 이상의 전류가 중성선에 흐를 경우 동작하게 된다.

표 2 영상분 고조파에 따른 변압기 1차측 전류
Table 2 Transformer primary currents according to zero sequence harmonic

영상분 [%]	상전류[A]			영상분 [A]	N 상 [A]
	A 상	B 상	C 상		
0.00	9.59	9.59	9.59	0.00	0.00
1.00	9.67	9.67	9.67	1.33	3.99
1.20	9.71	9.71	9.71	1.60	4.80
1.40	9.76	9.76	9.76	1.86	5.58
1.60	9.82	9.82	9.82	2.13	6.39
1.80	9.88	9.88	9.88	2.39	7.17

3.3 전원 전압 불평형에 따른 영상전류

전원측 전압 불평형으로 인한 영상전류의 영향을 분석하였다. 표 3은 불평형에 따른 영상전압의 크기와 그에 따른 각 상전류의 변화를 보여준다. 각 상전류는 정상, 역상, 영상 시퀀스 전류의 합으로 나타나게 되는데, 정상, 역상 합성 벡터와 영상 전류 벡터의 관계에 따라 특정 상의 전류는 증가하고 특정상의 전류는 감소하게 됨을 확인하였다. 즉, 2차측 부하 전류는 평형으로 나타나지만 1차측 전류는 심한 불평형 상태가 되고 중성선 전류도 증가됨을 확인하였다. 불평형 정도가 심할 경우 특정상의 OCR이 동작하게 된다. 물론 부하 불평형이나 영상분 고조파가 함께 존재한다면 1차측 전류 불평형은 더욱 확대될 수 있다.

표 3 전압 불평형에 따른 변압기 1차측 전류
Table 3 Transformer primary current due to unbalanced voltage

영상분 [%]	상전류[A]			영상분 [A]	N 상 [A]
	A 상	B 상	C 상		
0.00	9.59	9.59	9.59	0.00	0.00
1.00	8.34	11.07	9.52	1.55	4.65
1.20	8.13	11.37	9.53	1.86	5.58
1.40	7.92	11.66	9.54	2.17	6.51
1.60	7.72	11.96	9.57	2.48	7.44
1.80	7.52	12.25	9.61	2.79	8.37

3.4 실측 데이터에 기반한 영상 전류 분석

실측 전압에 대한 FFT 분석 결과 3, 5, 7, 9 고조파 성분이 약간 포함되어 있고 기본파에 대한 대칭 성분 분석 결과 영상분, 정상분, 역상분 전압이 각각 $0.01\angle -86.39^\circ$, $0.98\angle -7.10^\circ$, $0.008\angle 177.82^\circ$ p.u.로 나타났다. 그림 8과 9는 각각 실측 전압의 파형과 FFT 분석 결과를 나타낸다. 실측 전압은 영상분이 약 1% 정도로 불평형과 영상분 고조파가 모두 포함된 상태이다. 전원측 전압은 규정범위내의 비교적 양질의 전원을 공급하고 있음을 확인할 수 있다. 실측 전압을 바탕으로 부하의 운전조건 변화에 따른 변압기 1차측 전류를 분석하였다. 3상 평형인 조건과 내선규정에서 제한하는 범위내의 불평형 부하 조건에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 표 4의 결과로부터 B상 전류는 확대되어 과전류 상태가 되고 A상 및 C상의 전류는 상대적으로 작아짐을 알 수 있다.

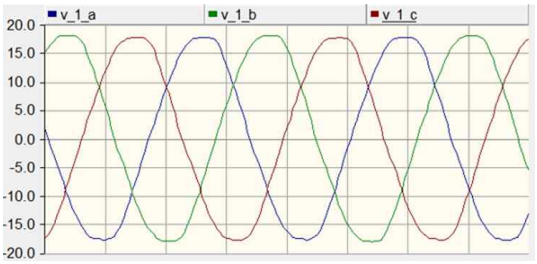


그림 8 실측 전압 파형
Fig. 8 Waveform of the measured voltage

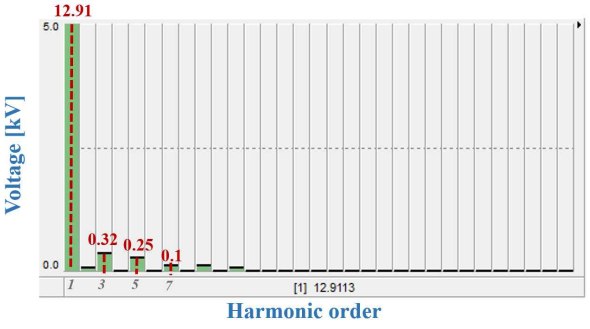


그림 9 실측 전압에 대한 FFT 분석
Fig. 9 FFT analysis of the measured voltage

표 4 부하 운전 조건에 따른 변압기 1차측 전류
Table 4 Transformer primary current according to load operating condition

Case	부하 조건[%]	A 상[A]	B 상[A]	C 상[A]
1	33, 33, 33	8.33	11.25	9.93
2	30, 38, 32	7.69	12.17	9.67
3	32, 38, 30	8.83	12.14	9.19
4	38, 32, 30	9.24	11.05	9.35

표 5는 Case 2 조건에서의 1차측 전류 분석 결과이다. 그림 10은 변압기 1차측 전류 시퀀스 벡터도를 나타낸다. B상 전류의 경우 정상분과 역상분의 합 벡터와 영상 성분 벡터의 위상이 유사하여 벡터 합의 결과 전류가 확대되었으며 A상 및 C상의 경우 영상분 벡터로 인해 상전류가 줄어들게 되었다. 각 상에서의 영상 전류는 1.94 A로, 중성선에서 합성되어 5.82 A가 흘렀다.

실측 전압의 경우 정상 범위의 품질을 가진 상태였지만 연계 변압기 영상 회로 특성에 의해 영상전류가 크게 확대되고 그 영향으로 변압기 1차측에 심한 전류 불평형과 특정상에 과전류를 유발하였다.

표 5 Case 2 부하 조건에서의 상전류 및 시퀀스 전류
Table 5 Phase and sequence currents for the load condition of Case 2

구분		전류 [A]
상전류	A 상	$7.69\angle -15.26^\circ$
	B 상	$12.17\angle -133.48^\circ$
	C 상	$9.67\angle 117.07^\circ$
시퀀스 전류	영상분	$1.94\angle 202.73^\circ$
	정상분	$9.80\angle -10.49^\circ$
	역상분	$0.67\angle 130.37^\circ$

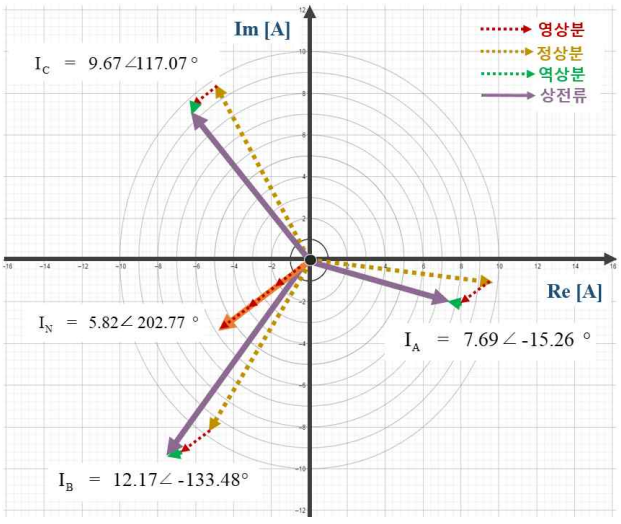


그림 10 Case 2 부하 조건에서의 전류 벡터도
Fig. 10 Vector diagram of the sequence currents for the load condition of Case 2

4. 결 론

본 논문에서는 분산전원 연계 계통에서의 OCR 오동작 현상 원인 규명과 실측 데이터에 기반한 분석을 수행하였다. 분산전원 연계 변압기인 Yg-D 및 Yg-Yg-D 결선의 경우 전원측 영상전압으로 인해 영상 전류가 크게 확대될 수 있으며 이는 중성선

전류를 증가시킬 뿐 아니라 시퀀스 전류 관계에 따라 심한 전류 불평형을 유발할 수 있다. 영상분 고조파로 인한 영상 전류의 경우 중성선의 전류를 크게 증가시키지만 불평형에 의한 영상 전류는 각 상별 전류 불평형을 유발하여 특정 상에 과전류를 발생시킬 수 있다. 이러한 영상 전류로 인해 분산전원 연계점에서 OCGR 및 OCR 오동작 문제가 발생하고 있다. 앞으로 분산전원의 계통 연계와 비선형 부하로 인한 고조파 유입이 더욱 증가할 것으로 전망되므로 전원측 영상 전압에 대한 엄격한 관리와 대책이 필요하다. 또한 분산전원 연계 규정 및 계전기 정정치 등에 대한 검토도 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 사외공모 기초연구(개별)에 의해 지원되었음(과제번호: R18XA06-68)

References

[1] Jong-Gyeoum Kim, Young-Jeen Park, "The Measurement & Analysis of Voltage Unbalance Factor at LV Customer of Three-Phase Four-Wire System", *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 18, No. 6, pp. 91-99, Nov. 2004.

[2] Jung-Eun Lee, Young-Joo Song, Hong-Kyoo Choi, Tae-Hoon Kim, In-Tae Kim, "A Study on Application for Y-Tz Transformer Winding Method to Decrease the Current Unbalance on the Source Side", *The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 63, No. 9, pp. 1206-1211, Jul. 2014.

[3] Jong-Gyeum Kim, "A New Analysis for Load Unbalance Factor", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers P*, Vol. 55, No. 2, pp. 67-72, Jun. 2006.

[4] Korea Electric Association, "Consumer's Electrical Installation Guide", 2016.

[5] 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", *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 22, No. 09, pp. 111-119, 2008.

[6] Dong-Yeol Shin, Yong-woo Park, Han-Ju 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 Engineer*, Vol. 57, No. 08, 2008.

[7] Arthur R. Bergen, Vijay Vittal, *Power Systems Analysis, 2nd Edition*, Prentice-Hall, pp. 470-472, 2000.

[8] Aeso International Inc, "Transformer Modelling Guide," Jul. 08, 2014.

저 자 소 개

박 종 일 (Jong-Il Park)

1982년 5월 21일생. 2010년 부경대학교 전기공학과 졸업. 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2018년~현재 부경대학교 대학원 전기공학과 박사과정

E-mail : tm0111@naver.co.kr

이 계 병 (Kyebyung Lee)

1979년 12월 8일생. 2006년 동의대 전기공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2018년 고려대 대학원 전자전기공학과 졸업(박사). 현재 부경대학교 친환경수송시스템연구소 리서치펠로우

E-mail : kyebyung@korea.ac.kr

박 창 현 (Chang-Hyun Park)

1974년 12월 25일생. 2007년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 부경대학교 전기공학과 교수

E-mail : spch@pknu.ac.kr