ISSN 1229-800X The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 66P, No. 3, pp. 99～104, 2017
http://doi.org/10.5370/KIEEP.2017.66.3.099

단상 변압기 지그재그 결선에 의한 3고조파 전류 저감 효과 분석

Analysis of Reduction Effect of Three Harmonic Currents by Zigzag Wiring of Single Phase Transformer

김 종 겸† · 김 지 명*
(Jong-Gyeum Kim · Ji-Myeong Kim)

Abstract - The three-phase four-wire power distribution system can be used to supply power to single-phase and three-phase loads at the same time. There are linear loads and nonlinear loads as single-phase loads connected to each phase. The nonlinear load generates a harmonic current during the power energy conversion process. In particular, the single-phase nonlinear load has a higher proportion of generation of the third harmonic current than the harmonics of the other orders. In a three-phase four-wire system, the third harmonic current flows through the neutral wire to the power supply side, affecting the power supply side and the line. Furthermore, the magnitude of the current flowing in the neutral line can be higher than the current flowing in the individual phase. If the neutral current is higher than the phase current, the breaker may be blocked. Therefore, it is necessary to reduce the amount of current flowing in the neutral line by harmonics. There is a method of zigzag connecting a single phase transformer by a method of reducing 3 harmonic current. In this study, the method of reducing the magnitude of the three harmonic currents flowing through the zigzag wire by comparing the polarity and the negative polarity characteristics of the single phase transformer was compared through measurement and simulation.

Key Words : Three-phase four wire system, Harmonics, Nonlinear load, Single phase transformer, Voltage Unbalance, Zigzag wiring

1. 서 론

빌딩이나 상업용 건물 등에서 저압으로 층별 및 개별 사무실에 전력을 배분하는 간선의 배전선로는 단상부하와 3상 부하를 동시에 이용할 수 있으므로 3상 4선식을 주로 사용하고 있다. 3상 4선식의 각 상에 연결되는 부하에는 전등 전열과 같은 선형부하(linear load)도 사용되지만, SMPS와 같은 단상 전력변환장치가 부착된 비선형부하(nonlinear load)도 많은 편이다. 또한 팬과 같이 저압의 3상 유도전동기 속도제어를 위해 비선형 부하인 가변속 구동장치(ASD)를 사용하는 경우도 있다. 이들 부하 중에서 비선형 부하는 전력변환과정에서 고조파 전류가 발생한다[1]. 고조파 전류는 임피던스가 낮은 전원측 또는 병렬로 연결된 간선으로 흘러들어가 설비의 오동작, 전압의 상승, 고조파 전류에 의한 전력손실의 증가 등 전기품질에 나쁜 영향을 줄 수 있다[1-3].

3상 4선식에서 단상 비선형 부하의 사용시 발생하는 고조파 전류 성분 중에서 3고조파 전류는 다른 차수의 고조파보다 큰 편이다. 3상 4선식의 각 상에 연결된 단상 비선형 부하에서 발생하는 3고조파 전류가 중성선으로 흐를 경우 중성선의 전류가 각 상의 전류보다 높아지므로 이를 줄일 필요가 있다. 일반적으로 부하용량이 큰 곳에서는 3고조파 전류를 줄이기 위해 3상 변압기나 3권선 변압기를 지그재그 결선하여 고조파를 줄이는 방식을 많이 선택하고 있다[3]. 부하 용량이 클 경우 3상 변압기를 지그재그 결선하는 것이 유리하지만, 부하의 용량이 크지 않거나 비선형 부하의 사용빈도가 높을 경우 3상 4선식의 각 상에 3고조파 전류성분이 많이 포함된 곳에서는 작은 용량의 단상 변압기를 지그재그 결선하여 부하측 가까운 곳에 설치하여 지그재그 변압기로 흘러들어가게 하여 전원측 및 선로측의 전류 고조파 함유율을 줄일 수 있다.

그래서 본 연구에서는 3상 4선식에서 단상 비선형부하의 사용에 의해 발생하는 3고조파 전류를 저감하기 위해 가극성 및 감극성의 단상 변압기의 지그재그 결선 방법을 소개하고, 주로 많이 사용되고 있는 감극성의 단상 변압기를 지그재그 결선하여 중성선에 흐르는 3고조파 전류가 지그재그 변압기로 흘러가도록 하여 각 상에 흐르는 3고조파 전류를 줄일 수 있는 효과를 시뮬레이션과 측정을 통해 비교 분석하였다.

2. 시스템 구성 및 지그재그 결선

그림 1은 저압 3상 4선식 배전선로의 구성도이다. 단상부

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Gangneung-wonju National University, Korea
E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr
* Dept. of Electrical Engineering, Gangneung-wonju National University, Korea
접수일자 : 2017년 5월 9일
수정일자 : 2017년 7월 18일
최종완료 : 2017년 7월 19일

하는 각 상과 중성선에 3상부하는 선간에 각각 연결한다. 각 상에 연결되는 선형부하 및 비선형 부하의 용량은 상별로 적정하게 배분하여 3상 4선식에서 부하불평형률의 허용범위 이내가 되도록 설계하고 있다[4]. 각상에 배분된 부하용량이 다르거나, 사용되는 부하 용량이 다를 경우 전원측에 전압불평형을 일으킬 수 있다[5].

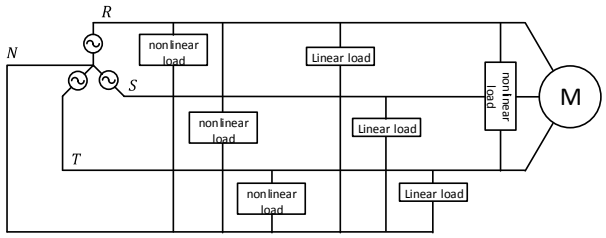


그림 1 3상 4선식의 선형 및 비선형 부하 결선도

Fig. 1 Linear and nonlinear load connection diagram of 3-phase 4-wire system

2.1 비선형 부하에 의해 발생하는 고조파

상 및 선간에 연결되는 비선형 부하는 전력변환과정에서 전류 고조파가 발생한다. 이때 단상 비선형 부하를 사용할 경우 주로 많이 발생하는 3고조파 전류는 중성선을 통해 전원측으로 흘러 전압에 고조파 성분이 포함된다. 비선형 부하에 의해 발생하는 고조파 전류의 차수는 식 (1)과 같다.

$$h = np \pm 1 \tag{1}$$

여기서 p는 전력반도체 소자의 개수이고, n은 정수이다.

단상 전파정류회로의 경우 식 (1)과 같이 3고조파 전류가 기본파 다음으로 크게 나타나고, 3상 전파정류회로의 경우에는 5고조파 전류가 기본파 다음의 크기를 가지게 된다. 비선형 부하의 사용으로 인해 선로에 흐르는 전류는 식 (2)와 같이 기본파 전류 성분외 고조파 성분의 합이 된다[6].

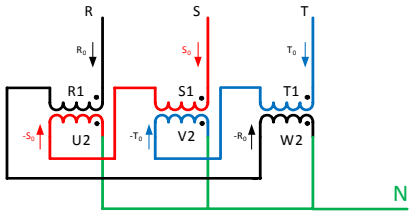
$$I = I_1 + \sum_{h}^{n} I_h \tag{2}$$

비선형 부하에서 발생하는 고조파 전류는 임피던스가 낮은 쪽으로 흐르게 되는데 부하측보다는 전원측이 더 낮으므로 전원측으로 흐르게 된다. 비선형 부하에서 발생한 고조파 전류가 각 상과 중성선을 통해 흐를 경우 연결된 간선에 고조파 성분이 포함되므로 전압 고조파의 발생, 손실증가 및 전기품질을 떨어뜨리는 요인이 될 수 있다. 특히 3상 4선식의 간선에서 중성선은 3고조파 전류가 흐를 수 있는 통로 역할을 하게 되는데 이때 중성선에 흐르는 3고조파 전류가 상에 흐르는 전류보다 높은 경우 차단기를 트립시킬 수 있는 가능성이 있으므로 이 고조파 전류의 크기를 낮출 필요가 있다.

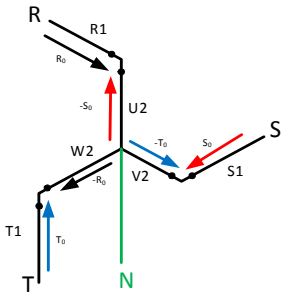
2.2 지그재그 결선에 의한 3고조파 저감

3고조파 전류 저감을 위해 3상 변압기를 지그재그 결선하는 경우도 있고, 단상 변압기의 극성을 고려하여 지그재그 결선하여 사용할 수도 있다. 본 연구에서는 단상 변압기의 가극성 및 감극성 결선방법에 따라 3고조파 전류를 줄이는 방법을 소개하고, 감극성을 적용하여 고조파 전류를 줄이는 것에 대해 측정과 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

그림 2(a)는 감극성의 단상 변압기 지그재그 결선도로 3개의 단상 변압기를 각 상마다 연결한 후 변압기 1, 2차측에 대해 지그재그로 결선한다. 그림 2(b)는 감극성 단상 변압기를 그림 2(a)와 같이 지그재그 결선하였을 경우 각각의 단상 변압기 내부에서 나타나는 자속의 흐름을 벡터도로 나타낸 것이다. 이때 1차측과 2차측간의 지그재그 결선 방법에 따라 R_0, S_0, T_0 과 $-R_0, -S_0, -T_0$ 의 회전 방향이 시계방향으로 바뀌게 되므로 방향이 서로 다른 두 자속이 쇄교하게 되므로 3고조파 전류는 상쇄된다.



(a) Zig-zag connection diagram



(b) Vector diagram

그림 2 감극성 변압기의 지그재그 결선 및 벡터도

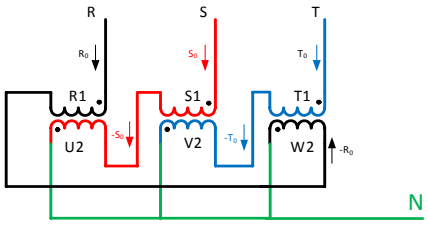
Fig. 2 Zig-zag connection and vector diagram of a decoupling transformer

그림 3(a)는 가극성 변압기 지그재그 결선방법을 나타낸 것이고, 그림 3(b)는 가극성 단상 변압기를 지그재그 결선하였을 경우 각각의 단상 변압기 내부에서 나타나는 자속의 흐름을 벡터도로 나타낸 것이다. 감극성과 마찬가지로 1차측과 2차측간 지그재그 결선에 따라 R_0, S_0, T_0 과 $-R_0, -S_0, -T_0$ 의 회전 방향이 시계방향으로 되므로 방향이 서로 다른 두 자속이 쇄교하여 3고조파 전류가 상쇄된다.

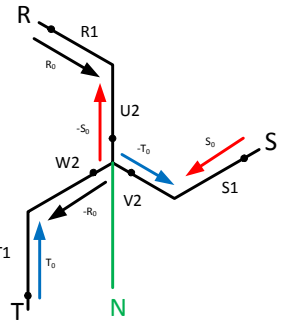
3고조파 전류를 저감하기 위해 설치하는 지그재그 변압기의 용량은 다음과 같이 구하면 된다.

$$VA_{rating} = \frac{1}{3}(V_{RS} \times I_N) \tag{3}$$

여기서 V_{RS} 는 선간전압이고, I_N 은 중성선에 흐르는 전류이다.



(a) Zig-zag connection diagram



(b) Vector diagram

그림 3 가극성 변압기의 지그재그 결선 및 벡터도

Fig. 3 Zig-zag connection and vector diagram of polarity transformer

3. 계산 및 측정 결과 분석

본 연구에서는 3상 4선식 선로에 단상 다이오드로 구성된 전파 정류회로를 상별로 연결한 상태에서 3고조파 전류가 중성선을 통해 전원 및 선로로 흐르는 것을 저감하기 위해 단상 변압기를 지그재그 결선하기 전과 결선 후에 중성선과 선로에 나타나는 전류 고조파에 대해 측정 및 계산을 통해 비교 분석하였다.

그림 4는 본 연구에 적용된 3상 4선식에서 비선형 부하가 연결된 회로에서 중성선에 흐르는 고조파 전류를 저감하기 위해 단상 변압기를 지그재그 결선한 회로도이다. 중성선과 각 상간에는 감극성의 단상 변압기를 지그재그 결선하여 비선형 부하에서 발생하는 3고조파 전류가 유입될 수 있도록

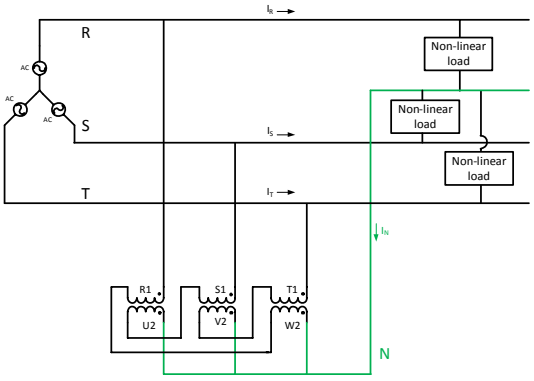
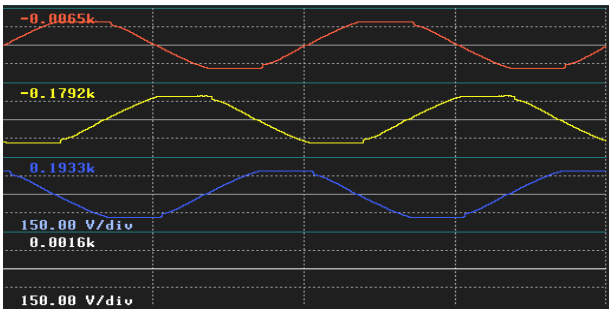


그림 4 Zig-zag 변압기가 설치된 회로도

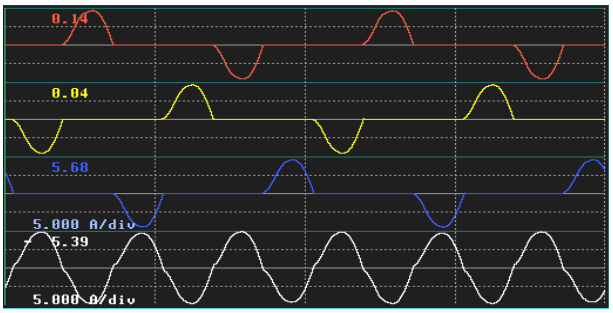
Fig. 4 Schematic with Zig-zag transformer

하였다. 단상 비선형 부하는 100Ω의 저항을 사용하였다.

단상 변압기의 지그재그 결선 효과를 비교 분석하기 위해 측정과 시뮬레이션을 실시하였다. 전압 및 전류의 파형 측정에는 HIOKI사의 Power Analyzer를 사용하였고, 시뮬레이션은 전자계과도해석 프로그램을 적용하였다[7]. 그림 5는 3상 4선식의 각 상에 단상 전파 정류기를 연결한 상태에서 2cycle 동안 측정한 전압 및 전류 파형이다.



(a) Voltage waveform



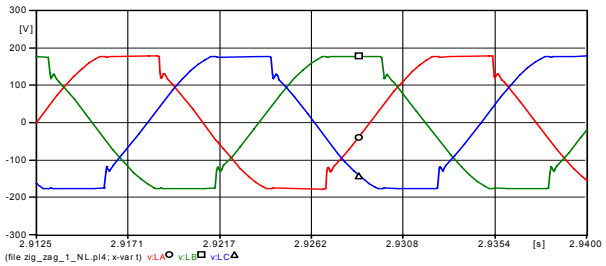
(b) Current waveform

그림 5 지그재그 결선전 측정한 전압 및 전류 파형

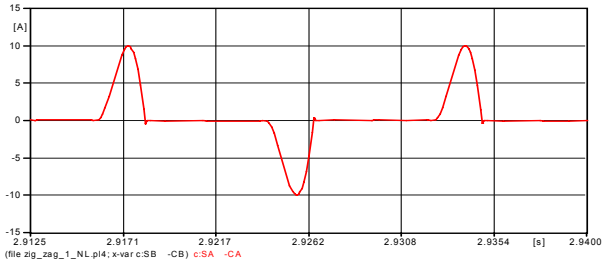
Fig. 5 Phase voltage, phase current and neutral current measured before zig-zag connection

그림 5(a)에서 상전압은 비선형 부하의 영향으로 고조파 성분이 포함된 것을 알 수 있고, 피크 전압은 플랫 탑(flap top)의 존재로 약간 줄어들었다. 그림 5(b)와 같이 각 상의 전류는 기본파외 홀수조파가 포함된 왜형된 형태를 나타내고 있으며, 상전류 중에서 3고조파 성분의 합에 해당되는 성분이 중성선에 그대로 흐르고 있음을 알 수 있다. 중성선에 흐르는 피크 전류는 상에 흐르는 전류의 피크와 같은 크기임을 알 수 있다. 이와 같은 상황에서 중성선에 흐르는 전류는 상에 흐르는 전류와 같거나 클 수 있으므로 케이블의 선정이나 차단기의 전류 선정에 참고자료가 될 수 있다.

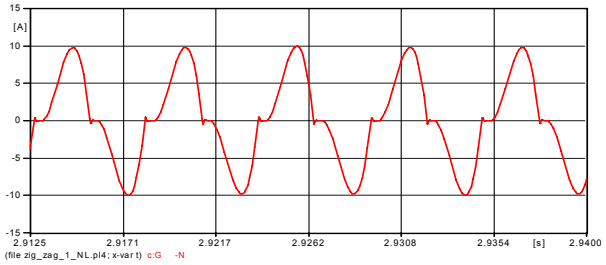
그림 6은 3상 4선식의 배전계통에서 단상 비선형 부하가 개별 상과 중성선에 연결된 상태에서 그림 5와 같은 측정조건하에 지그재그 결선을 채택하지 않은 경우 상전압, 상전류 및 중성선에 흐르는 전류를 시뮬레이션한 것이다. 그림 6(a)는 그림 5(a)와 같은 형태의 전압파형을 나타낸 것으로서 플랫탑과 고조파 성분이 함께 포함된 것을 확인할 수 있다. 그림 6(b)는 그림 5(b)의 한상에 대한 전류파형이고, 그림 6(c)는 그림 5(b)의 하단에 위치한 중성선에 흐르는 전류와 같은 형태로 같은 크기의 전류가 흐름을 확인할 수 있다.



(a) Phase voltage



(b) R-phase current



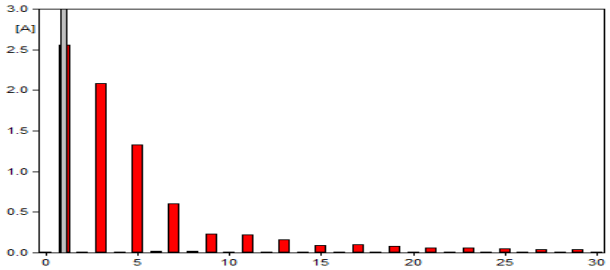
(c) Neutral line current

그림 6 지그재그 결선전 시뮬레이션한 상전압, 상전류 및 중성선 전류

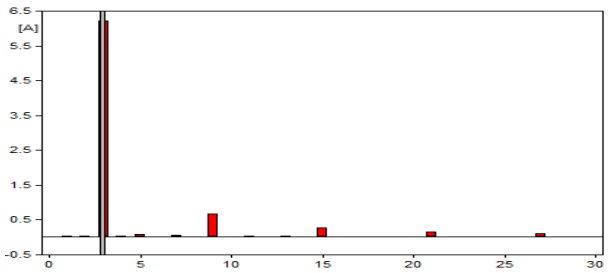
Fig. 6 Simulated phase voltage, phase current and neutral current before zig-zag connection

3상 4선식에서 비선형 부하가 연결된 상태에서 발생하는 고조파 성분에 의해 각 상 및 중성선에 흐르는 전류 성분 중에서 차수별 고조파의 크기를 분석하였다. 그림 7은 그림 6에서 R상 및 중성선에 흐르는 전류 성분에 대한 차수별 스펙트럼을 분석한 것이다.

그림 7(a)는 그림 6(b)에서의 전류 파형에 대해 차수별 크기를 나타낸 것으로서 식 (1)과 같이 단상 비선형부하에서 전력반도체 소자의 개수에 의해 발생하는 고조파 차수별 크기가 그대로 반영된 것을 알 수 있다. 즉 고조파전류는 기본파 외 홀수 고조파가 순차적으로 크기를 나타나고 있다. 그림 7(b)는 중성선에 흐르는 전류에 대한 차수별 크기를 스펙트럼 분석한 것으로서 기본파 성분은 없고, 3고조파가 가장 크게 나타나는데, 이 3고조파의 크기는 그림 7(a)에서의 3고조파 크기의 3배에 해당되는 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 따라서 중성선에 흐르는 전류의 크기를 줄일 수 있는 대안 제시가 필요하게 된다. 그래서 단상 변압기를 지그재그 결선하여 3고조파 전류를 줄일 수 있는 효과에 대해 해석과 측정을 통해 분석하였다.



(a) R phase

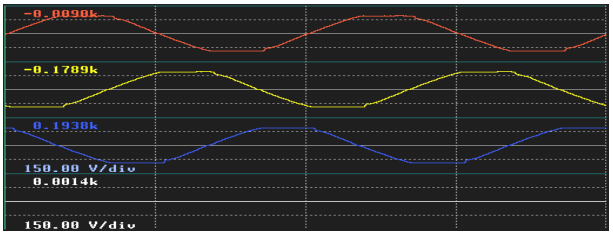


(b) Neutral line

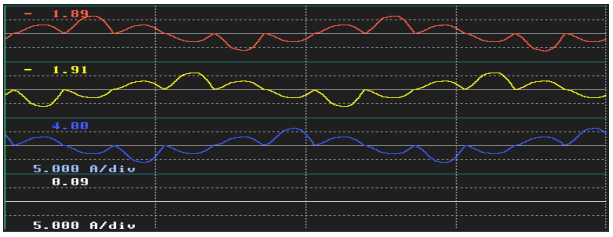
그림 7 R상 및 중성선의 전류 고조파 스펙트럼

Fig. 7 Current harmonic spectrum of R-phase and neutral line

그림 8은 감극성인 단상 변압기 3대를 지그재그 결선하고서 2cycle 동안 측정한 전압 및 전류 파형을 나타낸 것이다. 그림 8(a)는 전압파형으로 비선형 부하의 영향으로 고조파 성분에 플랫탑 현상이 포함된 형태로 지그재그 결선한 변압기를 사용하지 않은 그림 5(a)와 차이가 없음을 알 수 있다. 그림 8(b)는 상전류에 대한 파형으로 지그재그 변압기의 연결로 인해 그림 5(b)의 전류 파형과는 약간 다르게 특정 고



(a) Voltage waveform



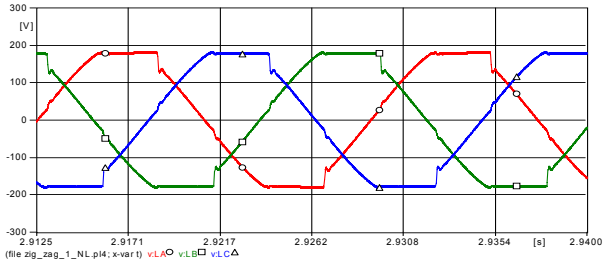
(b) Current waveform

그림 8 지그재그 결선후 측정한 상전압, 상전류 및 중성선 전류

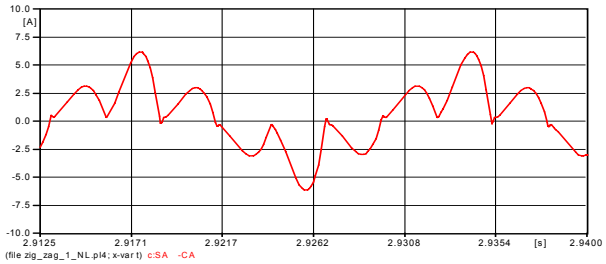
Fig. 8 Measured phase voltage, phase current and neutral current after zig-zag connection

조파 성분이 저감된 형태를 지니고 있다.

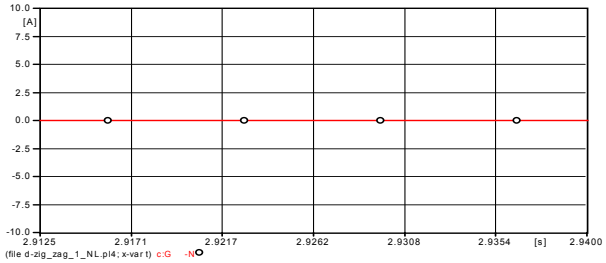
그림 9는 단상 비선형부하가 연결된 3상 4선식에서 3고조파 전류를 저감하기 위해 단상 변압기를 지그재그 결선한 이후 그림 8과 같은 상황에서 상전압 및 선로와 중성선에 흐르는 전류를 시뮬레이션한 것이다.



(a) Phase voltage



(b) R-phase current



(c) Neutral line current

그림 9 지그재그 결선후 시뮬레이션한 상전압, 상전류 및 중성선 전류

Fig. 9 Simulated phase voltage, phase current, and neutral current after zig-zag wiring

그림 9(a)는 고조파 성분이 포함된 상전압으로 피크가 감소한 플랫탑 현상이 존재하는 것으로 측정한 그림 8(a)와 같은 형태를 갖고 있다. 그림 9(b)는 상전류로 지그재그 결선을 채택하지 않은 그림 (b)와 달리 고조파 성분이 저감된 형태를 지니고 있다. 그림 9(c)는 중성선에 흐르는 전류에 대한 계산 한 것으로 지그재그 결선의 공통 연결선이 부하측에만 연결되기 때문에 중성선에는 전류가 흐르지 않게 된다. 그래서 상전류의 전류파형에 대한 차수별 전류 크기를 그림 10과 같이 분석하였다. 분석결과 지그재그 결선의 채택으로 인해 상전류에서는 3고조파 성분의 전류가 거의 저감됨을 알 수 있다.

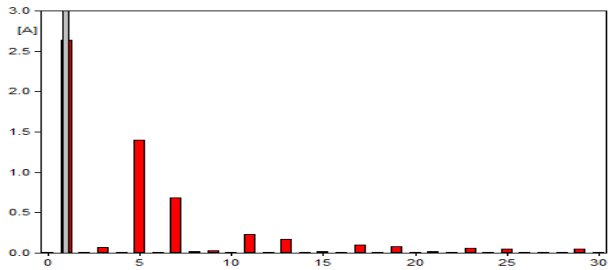


그림 10 R상 전류 고조파 스펙트럼

Fig. 10 Current harmonic spectrum of R-phase

4. 결 론

컴퓨터와 같은 단상 비선형 부하를 많이 사용하는 건물에서는 3상 4선식의 배전방식을 많이 채택하고 있다. 이들 단상 비선형 부하의 사용시 발생하는 고조파 중에서 3고조파 전류의 비중이 높을 경우 중성선을 통해 전원 및 선로에 흐르게 되어 전기품질에 나쁜 영향을 줄 수 있다. 특히 상별로 존재하는 3고조파 전류가 중성선에 그대로 반영될 경우 전류값이 높아 차단기 트립과 같은 문제를 일으킬 수 있으므로 3고조파 전류의 크기를 저감할 필요가 있다. 그래서 단상 변압기를 지그재그 결선하여 3고조파 전류의 크기를 줄일 수 있는 연구를 진행하였다.

본 논문에서는 단상 변압기 3대를 지그재그 결선하여 3고조파 전류의 비중이 높은 3상 4선식 선로에 연결하여 선로와 중성선에 흐르는 3고조파 전류의 크기를 저감시키는 방법을 가극성 및 감극성 변압기에 대해 각각 소개하고, 주로 많이 적용되고 있는 감극성 변압기를 이용하여 측정과 시뮬레이션을 통해 비교 분석하였다. 분석결과 비선형 부하의 영향으로 전압성분에는 플랫탑 현상이 포함된 전압고조파 성분이 존재하더라도 지그재그 결선에 의해 상 및 중성선에 흐르는 전류에서 3고조파 성분이 거의 저감됨을 알 수 있었다.

References

[1] Theodore Wildi, “Electrical Machines, Drives and Power Systems”, Prentice Hall, 2002.

[2] P. P. Khera, "Application of zig-zag transformers for reducing harmonics in the neutral conductor of low voltage distribution system" *Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the IEEE*, pp. 1092, 1990, Oct.

[3] Ji-Ho Kim et al., “Performance Test and Design of Harmonic Reduction Hybrid Transformer”, *KIEE*, vol. 63P, no. 4, pp. 277-282, Dec., 2014.

[4] KEA, “Extension rules”, 2016.

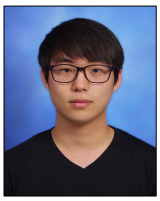
[5] Jong-Gyeum Kim, et al, “Analysis on the Characteristics of Voltage Unbalance Factor by Load Variances”, *KIEE*, vol. 54P, no. 1, pp. 47-52, March, 2005.

[6] Jong-Gyeum Kim & Eun-Woong Lee, “Analysis on the Harmonics Characteristics Due to Increase &

Decrease of Nonlinear Load", *KIEE*, vol. 52P, no. 3, pp. 100-106, September, 2003.
[7] H. W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.

저 자 소 개

김 종 겸(Jong-Gyeum Kim)
1961년 10월 3일생. 1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987. 1~1988. 1 KT 근무. 1988. 1~1996. 3 K-water 근무. 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 2013년~2014년 위스콘신 매디슨 대학교 방문교수.
Tel : 033) 760-8785
E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr



김 지 명(Ji-Myeong Kim)
1990년 10월 30일생. 2015년 강릉원주대학교 전기공학과 졸업. 2017년 8월 강릉원주대학교 산업대학원 전기공학과 졸업

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.