

3상 4선식 저압 배전선로에서 선형 및 비선형 부하의 사용시 전압 불평형률 비교 분석

Comparative Analysis of Voltage Unbalance Factor on the use of Linear and Non-linear loads in Three-phase Four-wire Low Voltage Distribution Line

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

Abstract - In the three-phase four-wire low-voltage power distribution equipment, single-phase and three-phase load have been used mainly mixed. Also linear and nonlinear loads have been used together in the same conditions. In a three-phase four-wire distribution line, the current distribution of three-phase linear load is almost constant in each phase during driving or stopping, but the single-phase load is different from each other for each phase in accordance with the operation and stop. So that the voltage unbalance is caused by the current difference of each phase. In the three-phase four-wire distribution system, non-linear load is used with linear load. The presence of single-phase nonlinear loads can produce an increase in harmonic currents in three-phase and neutral line. It can also cause voltage unbalance. In the present study, we analyzed for the voltage unbalance fluctuations by the operation pattern of the single and three-phase linear and non-linear load in three-phase four-wire low voltage distribution system.

Key Words : Harmonics, Linear load, Non linear load, Three-phase four-wire, Voltage unbalance

1. 서 론

산업현장에서 3상 동력과 단상인 전등·전열부하는 별도의 변압기를 사용하여 전원을 공급할 수 있도록 설계하는 경우도 있지만, 3상 동력부하와 단상인 전등·전열부하에 한 대의 변압기를 사용하여 전기를 공급하도록 3상 4선식의 배전방식을 채용하는 경우가 많은 편이다. 3상 4선식 선로에서는 3상 부하와 단상 부하가 함께 연결된다. 3상 동력 부하로는 전동기와 같은 선형부하 외에 인버터와 같은 전력변환장치인 비선형 부하가 있고, 단상 부하에도 전등·전열과 같은 선형 부하 외 충전장치 그리고 컴퓨터 등과 같은 단상 전력변환장치의 비선형 부하가 있다[1].

전압 불평형은 배전시스템의 어느 곳이나 존재할 수 있는 것으로서 3상 회로에서 각 상의 전압이 같지 않은 것을 말한다. 전압 불평형은 대부분의 경우 전원측보다 수용가의 부하에서 변화 때문에 발생한다. 배전선의 3상중에서 한 상 또는 여러 상의 부하가 서로 다를 때 전압 불평형이 발생된다[1-7]. 3상 4선식에서 전압 불평형을 최소화하기 위해 각 상에 부하의 분배를 운전조건과 용량에 따라 적절하게 배분하지만, 실제 운전 시간과 운전상황 그리고 단상 선형 및 비선형 부하의 사용으로 인해 전

압 불평형이 발생할 수 있다[3,5].

3상 4선식에서 3상 부하만 운전할 경우 전압 불평형은 거의 발생하지 않지만, 단상의 선형 및 비선형 부하가 각 상에 연결되어 운전할 경우 중성선에 전류가 흐르기 때문에 전압의 크기와 위상이 상별로 서로 달라지기 때문에 중성점의 이동에 따른 선간 전압의 크기 변화에 따른 전압불평형률 계산이 필요하다[7,8]. 비선형 부하가 연결된 경우 상별 전압과 선간전압에 고조파 성분의 존재할 경우 전압불평형률 계산에도 이를 반영해야 한다.

그래서 본 논문에서는 3상 4선식 설비에서 3상 선형부하와 단상 선형부하 및 비선형 부하의 운전패턴에 따라 발생할 수 있는 전압 불평형을 전압의 크기와 위상각을 고려한 것과 중성점 이동을 고려한 선간전압의 크기에 의한 전압불평형률을 비교 분석하였다.

2. 3상 4선식 부하 분포와 전압 불평형

그림 1은 전압 3상 4선식 선로에서 단상, 3상의 선형 및 비선형 부하가 연결된 계통도를 나타낸 것이다. 3상부하는 선형 및 비선형 부하가 3상 라인에 연결되어 있고, 단상 선형 및 비선형 부하도 중성선을 기준으로 3상 선로의 각 상에 연결되어 있다.

3상 4선식 저압 배전라인에서 부하의 불평형 분배와 운전 그리고 비선형 부하의 운전으로 전압 불평형이 나타날 수 있다. 전압 불평형률 구하는 방법으로는 수식적인 방법과 도식적인 방법이 있지만, 부하의 연속적인 사용에서 불평형률을 구해야 하는 점 때문에 주로 수식적인 방법을 이용하고 있다[2,4,6].

† 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.

Received : October 31, 2016; Accepted : January 23, 2017

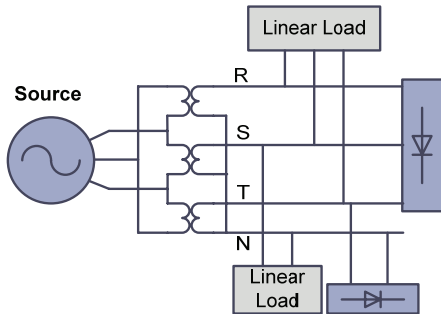


그림 1 3상 4선식 부하 연결도
 Fig. 1 3-phase 4-wire load wiring diagram

전압 불평형률은 식 (1)과 같이 정상분 전압(V_1)에 대한 역상분 전압(V_2) 또는 정상분 전압에 대한 영상분 전압(V_0)의 비율로 정의하고 있다[2,4,6].

$$VUF_1 = \frac{V_2}{V_1} \tag{1}$$

$$VUF_0 = \frac{V_0}{V_1} \tag{2}$$

식 (1)에서 정상분 전압과 역상분 전압을 상전압으로만 표현할 경우 중성점에 나타나는 전압을 고려할 수 없게 된다. 그래서 각 상전압 대신에 V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} 의 선간전압을 식 (2)와 같이 정상분 전압 V_1 과 역상분 전압 V_2 를 대칭성분으로 변환하면 전압 불평형에서 기기의 동작특성을 분석할 때 편리하지만, 전압불평형이 비대칭일 경우 해석에 약간의 오차가 발생할 수 있다[2,3,6,7,8].

$$V_1 = \frac{V_{ab} + a \cdot V_{bc} + a^2 V_{ca}}{3} \tag{3}$$

$$V_2 = \frac{V_{ab} + a^2 \cdot V_{bc} + a V_{ca}}{3}$$

여기서 $a = 1 \angle 120^\circ$, $a^2 = 1 \angle 240^\circ$ 이다. 실제 3상 전압의 위상각을 고려하지 않고 선간전압의 크기를 측정하여 전압 불평형률을 분석할 경우 전압 불평형률은 식 (4)와 같이 구하고 있다[1~8].

$$VUF_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \tag{4}$$

식 (4)에서 β 는 식 (5)와 같이 각 선간 전압으로 구하면 된다.

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2} \tag{5}$$

전압 불평형이 발생할 경우 전동기와 같은 회전기기의 경우 손실증가와 출력감소로 이어질 수 있으므로 전압불평형률이 가능한 최소가 되도록 기기를 설계하거나 부하의 분배와 운전이 되도록 요구하고 있다[2,4].

3. 계산 및 결과 분석

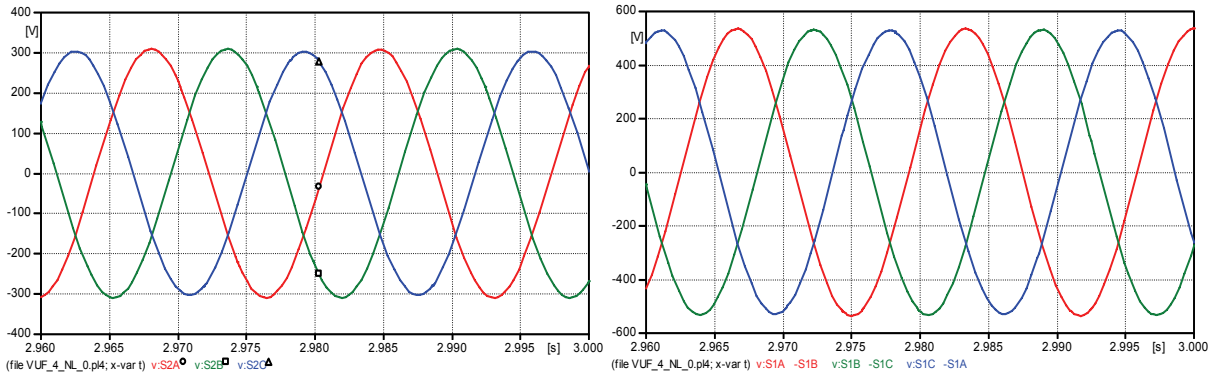
3상 4선식 선로에서 선형 및 비선형 부하가 함께 사용하는 경우가 대부분이다. 3상 선형부하의 용량은 3kVA로 역률은 0.85이고, 단상 선형부하의 경우 역률 0.8에 3kVA의 용량이고, 단상 비선형 부하의 용량도 3kW를 선정하였다.

본 연구에서는 위의 여러 부하를 대상으로 (I) 3상 4선식 저압 배전선로에 3상 선형부하와 단상선형부하의 운전, (II) 3상 선형부하와 단상 비선형 부하 운전 그리고 (III) 3선 선형부하에 단상 선형 및 비선형 부하가 연결된 3가지 운전조건을 가지고서 운전할 경우 발생하는 전압의 변화에 대해 분석하였다. 해석결과 유도를 위해 전자계과도해석 프로그램을 이용하였다[9].

첫 번째(I)로 3상 4선식 저압 배전선로에 3상 선형부하에 단상 선형부하만 운전할 때의 전압 크기, 불평형을 그리고 위상각에 대한 분석결과는 그림 2와 같다. 선형부하만 운전하는 조건이므로 전압 고조파 성분이 나타나지 않았다. 그림 2(a)는 상전압의 파형을 나타낸 것이고, 그림 2(b)는 선간전압의 파형을 나타낸 것이다. 3상중에서 단상부하가 걸린 C상의 전압이 다른 두상의 전압에 비해 크기가 약간 낮게 나타나고 있다. 그림 2(c)는 3상 상전압과 중성선의 실효치 전압을 나타낸 것이다. 3상중에서 두상의 전압 크기는 거의 같지만, 단상 부하가 걸린 상의 전압은 약간 낮은 것을 볼 수 있다. 중성선에는 3상 대칭일 경우 나타나지 않는 4.591V의 전압이 나타나고 있다. 그림 2(d)는 상전압의 위상각을 나타낸 것으로서 각 전압의 위상각은 거의 120를 차이를 두고 분포함을 알 수 있다. 그래도 중성선에 전압이 존재하기 때문에 전압의 크기와 위상각을 고려한 것과 선간전압의 크기만으로 구한 전압 불평형률 계산에는 약간 오차가 발생하게 된다. 그림 2(e)는 선간전압의 크기를 나타낸 것으로서 단상부하의 사용으로 인해 한상의 전압이 다른 두상의 전압에 비해 약간 낮다는 것을 알 수 있다. 그림 2(f)는 식 (1), (2) 및 (4)로 구한 전압불평형률에 대한 계산 결과이다.

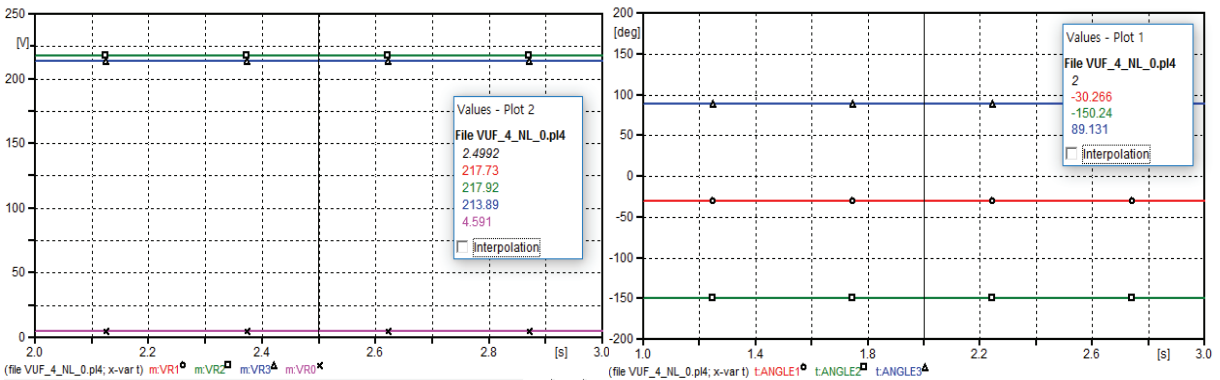
그림 2(f)에서 정상분에 대해 영상분의 전압비율 또는 정상분에 대한 역상분의 전압의 비율로 구한 전압 불평형률은 0.7%로 거의 일치하지만, 위상각을 고려하지 않고 선간전압의 크기만을 고려한 식 (4)의 전압불평형률은 다소 높게 나타났다. 이는 중성점전압의 영향으로 인해 상전압의 중성점이 변경되어 전압의 위상이 120°가 아니므로 위상을 고려한 전압 불평형률과 선간전압의 크기만으로 구한 전압불평형률의 차이라고 볼 수 있다.

두 번째(II)로 3상 4선식에서 3상 선형 부하에 단상 비선형 부하 하나만 운전할 때의 전압 크기, 전압 불평형률 그리고 위상각에 대한 분석결과는 그림 3과 같다. 그림 3(a)에서와 같이 비선형부하가 연결된 상의 전압이 고조파를 포함하게 되어 왜형된 것을 볼 수 있다. 그림 3(b)에서 비선형 부하의 영향으로 3상 선간



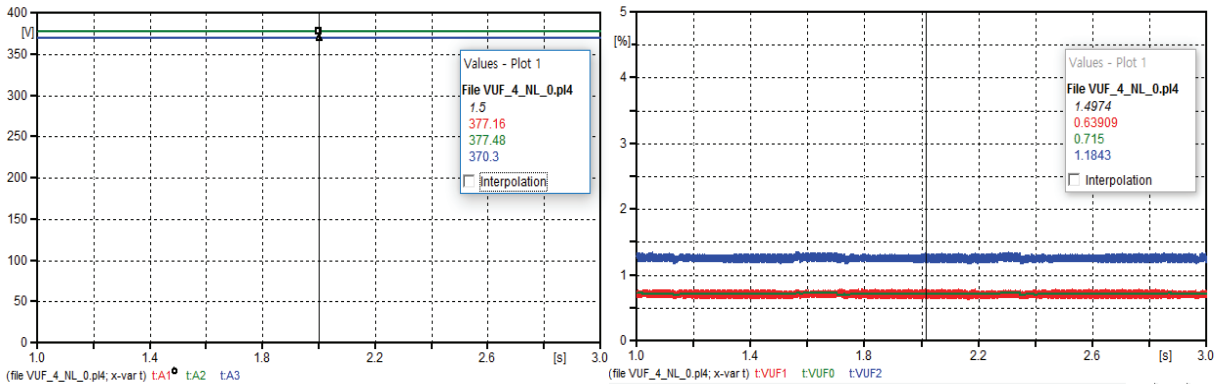
(a) 상전압 파형

(b) 선간전압 파형



(c) 상 및 중성점 전압의 크기

(d) 위상각



(e) 선간 전압

(f) 전압 불평형률

그림 2 전압, 위상각 및 전압 불평형률(I)

Fig. 2 Voltage, phase angle & voltage unbalance factor (I)

전압의 두상의 겹쳐 전압에 고조파 성분이 나타나고, 선간전압에도 고조파 성분이 포함된 것을 확인할 수 있다. 그림 3(c)는 상전압의 크기를 나타낸 것으로서 단상 비선형 부하의 영향으로 연결된 상에도 중성선에도 고조파 전압이 나타남을 알 수 있다. 이때 고조파 전압은 주기적인 변화를 가지고 있다. 그림 3(d)는 상전압의 위상각을 나타낸 것으로서 3상 전압의 위상차가 120도의 범위에서 서로 조금 벗어나서 위치함을 알 수 있다.(-31.148°, -150.24°, 89.701°). 그림 3(e)는 3상 선간전압의 크기를 나타낸 것

으로서 단상 비선형 부하의 영향으로 선간전압이 다른 두 상에 비해 44V의 편차(345~389V)를 가지는 것을 알 수 있다. 그림 3(f)는 전압의 크기와 위상각을 함께 고려한 것과 전압의 크기만 고려한 전압불평형률의 비교 계산 결과이다. 이 전압불평형률은 내선규정에서 정하고 있는 3%의 범위를 벗어나지 않는다.

3상 4선식 선로에 3상 선형부하가 운전하고 있는 상황에서 단상 비선형 부하가 3상의 한상에 추가된 경우 그림 3(a),(b)에서와 같이 고조파 성분이 포함된 것을 알 수 있고, 그림 3(c)에서와 같

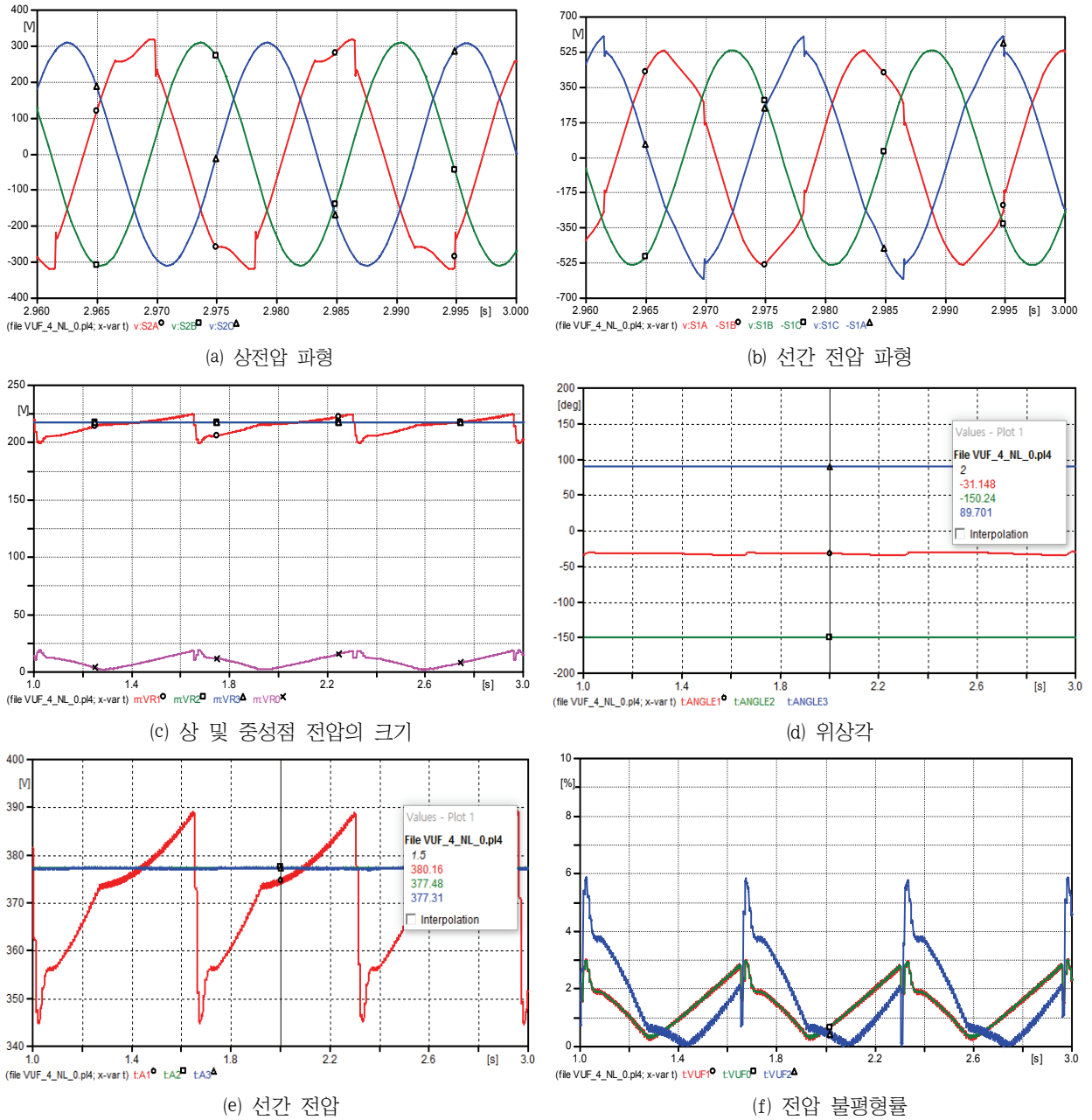


그림 3 전압, 위상각 및 전압 불평형률(II)

Fig. 3 Voltage, phase angle & voltage unbalance factor(II)

이 3고조파 성분의 존재로 인해 중성점에 전압이 단상 선형 부하만 운전할 때 보다 높고, 주기적인 크기 변화를 나타내고 있다. 3상 전압의 크기에 차이가 있고, 비선형 부하가 연결된 상의 전압에 고조파 성분의 포함으로 인해 중성점 전압이 높는데 위상차가 대칭이 아니므로 그림 3(f)에서와 같이 정상분에 대한 영상분으로 구한 전압불평형률(식 (2))과 정상분에 대한 역상분으로 구한 전압불평형률(식 (1))은 거의 동일한 결과를 나타내지만, 선간전압의 크기만으로 구한 식 (3)의 전압불평형률은 식 (1)로 구한

것에 비해 피크치가 거의 두 배 가깝게 됨을 알 수 있다. 선형부하만 사용한 경우에 비해 전압불평형률이 일정하지 않고 주기적으로 크기 변화를 나타내고 있다.

세 번째(III)로 3상 4선식 선로에 3상 선형부하에 단상 선형부하 및 비선형부하가 3상에서 두 상에 각각 연결하여 운전할 때의 전압 크기, 불평형률 그리고 위상각에 대한 분석결과는 그림 4와 같다. 그림 4(a)의 전압과 그림 3(a)의 전압 파형은 거의 유사하지만, 크기에서 약간의 차이가 난다. 3상 선로에서 비선형 부하

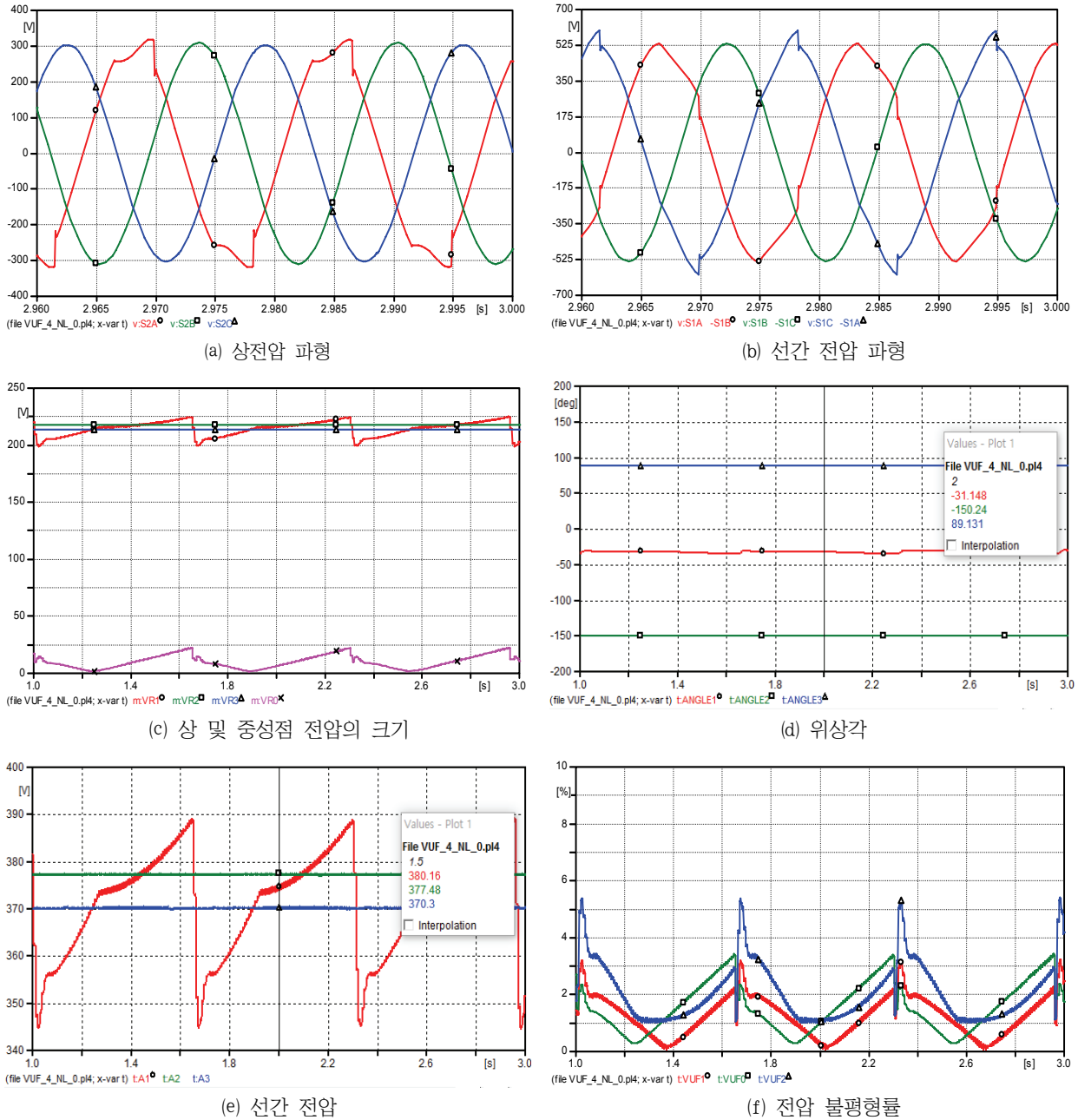


그림 4 전압, 위상각 및 전압 불평형률(Ⅲ)

Fig. 4 Voltage, phase angle & voltage unbalance factor(Ⅲ)

가 연결된 상의 전압파형이 왜곡된 것을 알 수 있다. 그림 4(b)의 선간전압과 그림 3(b)의 선간전압도 같은 형태를 나타내지만, 전압의 크기에서만 약간의 차이가 난다. 단상 비선형 부하가 연결된 선로에 의해 선간전압 파형은 두상에서 왜형이 발생됨을 알 수 있다. 그림 4(c)는 3상외에 중성선에 나타나는 전압의 크기를 분석한 것으로서 비선형 부하가 연결된 상에서 전압의 크기는 항상 일정하지 않고 변동함을 알 수 있으며, 비선형 부하에 의해 중성선에도 전압의 존재함을 알 수 있다. 중성선에 전압이 존재

함에 따라 3상 전압의 위상이 변화하게 된다. 그림 4(d)는 상전압의 위상각을 나타낸 것으로서 3상 전압의 위상차가 120도의 범위에서 서로 조금 벗어나서 위치함을 알 수 있다.(-31.148°, -150.24°, 89.131°). 그림 4(e)는 상전압의 크기와 위상각을 고려한 선간전압의 크기를 나타낸 것으로서 3상중 두상의 전압 크기는 일정한 크기를 나타내지만, 비선형 부하가 연결된 상의 전압은 진폭을 나타냄을 알 수 있다. 따라서 선간전압의 크기에 의한 전압불평형률이 일정하지 않고 변동함을 알 수 있다. 그림 4(f)는

전압의 크기와 위상각을 고려한 방식과 선간전압의 크기만을 고려한 전압불평형률에 대한 계산 결과이다. 이와 같은 운전조건에서 고조파 성분을 고려한 전압불평형률은 3% 범위를 벗어나고 있다.

3상 4선식 선로에 3상 선형부하가 운전하고 있는 상황에서 단상 선형 및 비선형 부하가 3상의 두상에 추가된 경우 그림 4(a), (b)에서와 같이 고조파 성분이 포함된 것을 알 수 있고, 그림 4(c)에서와 같이 3고조파 성분의 존재로 인해 중성점에 전압이 단상 비선형 부하만 운전할 때 보다 높고, 주기적인 크기 변화를 나타내고 있다. 3상중 두상의 전압 크기에 차이가 있고, 비선형 부하가 연결된 상의 전압에 고조파 성분의 포함으로 인해 중성점 전압이 높는데다 위상차가 대칭이 아니므로 그림 4(f)에서와 같이 정상분에 대한 영상분으로 구한 전압불평형률(식 (2))은 정상분에 대한 역상분으로 구한 전압불평형률(식 (1))보다 약간 높게 나타내지만 거의 같은 진폭변화를 나타내고, 선간전압의 크기만으로 구한 식 (3)의 전압불평형률은 식 (1)로 구한 것에 비해 피크치가 거의 두 배 가깝게 됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 3상 4선식 배전선로에서 3상 부하에 단상 선형 및 비선형 부하의 연결을 통해 발생하는 전압의 크기, 고조파 성분 및 위상변화 그리고 중성선에 나타나는 전압을 고려하여 전압 불평형률에 대해 분석하였다.

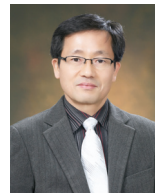
3상 4선식 선로에 3상 선형부하에 단상부하만 연결할 경우 중성선에 전압은 나타나지만, 고조파 성분이 존재하지 않아 정상분에 대한 영상분과 정상분에 대한 역상분 전압 불평형률은 서로 같은 결과를 나타내지만, 중성선에 전압의 존재시 3상의 위상각이 이동하는 것을 고려한 선간전압의 크기로 구한 전압불평형률은 앞의 두 경우보다 약간 높게 나타남을 알 수 있었다. 또한 3상 4선식에서 단상 비선형 부하를 연결하여 운전할 때 상전압 및 선간전압과 그리고 중성선에 전압 고조파 성분에 의해 주기적인 크기 변화가 나타나므로 전압 불평형률도 주기적인 진폭을 가지며 중성점 이동을 고려하지 않은 경우에는 3%의 허용범위에 근접하지만, 전압의 중성점 이동을 고려한 선간전압의 크기에 의한 전압불평형률은 3%의 허용범위를 벗어나고 있음을 확인할 수 있었다.

References

[1] Jong-Gyeum Kim, Eun-Woong Lee., "Analysis and Measurement of Current Harmonics Due to Non-linear Load in Low Voltage System", KIEE, Vol. 50B, No. 12, pp. 601-608, 2001.12
 [2] Roger C. Dugan et al., "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill, 2002
 [3] Jong-Gyeum Kim, Young-Jeen Park., "A Study on the

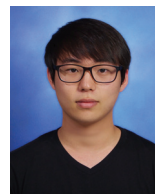
Characteristics of Capacitor by Asymmetrical Voltage Unbalance", KIEE, Vol. 59P, No. 1, pp. 18-23, 2010.03
 [4] P. Pillay and M. Manyange, "Definitions of Voltage Unbalance", IEEE Power Eng. Rev. Mag., Vol. 5, pp. 50~51, May 2001
 [5] Jong-Gyeum Kim, et al., "A Study on the Harmonic Characteristics of Nonlinear Load operated by Unbalance Voltage", KIEE, Vol. 52B, No. 10, pp. 491-500, 2003. 10
 [6] Jong-Gyeum Kim, et al., "The Comparison Study for Voltage, Current and Load Unbalance Factor", KIEE, Vol. 54P, No. 2, pp. 88-93, 2005. 06
 [7] Jong-Gyeum Kim, et al., "Comparison of Voltage Unbalance Factor for Line and Phase Voltage", KIEE, Vol. 54B, No. 9, pp. 403-407, 2005. 09
 [8] Jong-Gyeum Kim, et al., "Analysis on the Characteristics of Voltage Load Unbalance Factor by Load Variances", KIEE, Vol. 54P, No. 1, pp. 47-52, 2005. 03
 [9] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.

저 자 소 개



김 종 겹 (Jong-Gyeum Kim)

1961년 10월 3일생. 1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 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. 2016년 현재 강릉원주대학교 산업대학원 전기공학과 재학중.