

선형 및 비선형 부하 사용시 전류 및 부하불평형률에 대한 연구

A Study on the Current & Load Unbalance Factor in using Linear & Nonlinear Load

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

Abstract - Single-phase and three-phase load can be used together in 3-phase 4-wire system. Single-phase and three-phase loads can be classified as linear loads without harmonics and nonlinear with harmonics. Single-phase linear loads are linear loads such as lamps and heat, and single-phase nonlinear loads are power converters such as rectifiers. It is recommended that the distribution of loads in the 3-phase, 4-wire distribution lines be evenly distributed within a certain range. However, harmonic currents generated in a nonlinear load flow on the neutral line and affect the phase current magnitude. The difference in the magnitude of the individual phase current due to the influence of the harmonic current present in the neutral line can produce a difference in current and load unbalance. In this study, current unbalance ratio and load unbalance ratio which can occur when a combination of linear and nonlinear loads are applied to 3-phase 4-wire distribution line are calculated.

Key Words : Current unbalance factor, Harmonics, Linear load, Non-linear load, Load unbalance factor

1. 서 론

부하에 전원을 공급하는 여러 가지 배전방식 중에서 3상 4선식은 단상 부하와 3상 부하를 동시에 사용할 수 있어 널리 이용되고 있다. 3상 4선식 배전선로에는 선형부하(linear load)와 비선형부하(non-linear load)가 주로 많이 연결되는데, 단상 선형 부하로는 전등과 전열, 단상 비선형 부하로는 컨버터와 같은 것이 사용되고 있다[1~4]. 3상 선형부하로는 유도전동기와 같은 유도성 부하가 해당되고, 3상 비선형 부하로는 인버터와 같은 유도전동기 가변속도제어 장치(ASD:Adjustable Speed Drive)가 이에 해당된다[3,4]. 이들 선형 및 비선형 부하는 종류에 따라 연속적 또는 간헐적으로 사용할 경우 3상의 각 상전류 크기가 서로 다른 값을 가지게 된다. 3상 선로에 부하를 상별로 균등하게 분배하여 설치하고 사용할 경우에도 운전 조건과 사용 빈도 그리고 단상 선형 및 3상 비선형 부하의 전력변환과정에서 전류 고조파나 전압 고조파에 의해 상별 전류와 전압이 서로 다르게 나타날 수 있다[1]. 특히 3상 4선식의 경우 단상 비선형 부하에 의한 고조파 전류가 중성선 및 인접한 상에 흘러 상별 전류의 크기를 변화시키므로 전압불평형에도 영향을 주게 된다. 3상 4선식 선로에서 각 상에 연결된 부하의 크기는 일정범위 이내가 되도록 권

고하고 있으나[5] 비선형 부하에 의한 고조파 성분과 상전류의 불평형에 설비불평형의 범위를 초과할 경우 손실 증가 및 전기품질에 나쁜 결과를 낼 수 있다[1,3,4].

그래서 본 연구는 3상 4선식 배전선로에 선형부하와 비선형 부하의 사용 그리고 상별 용량에 차이가 날 경우 고조파성분에 의해 전류 불평형률이 부하불평형률과 어떤 연관을 가지는지 시뮬레이션과 측정을 통해 비교 분석하였다. 분석결과 비선형 부하에 의한 전류 고조파 성분이 포함된 경우에도 전류 불평형률과 부하불평형률은 매우 비슷한 결과를 가진다는 것을 확인할 수 있었다.

2. 전류 고조파와 왜형률 및 불평형률

2.1 선형 및 비선형 부하

선형부하는 전압 파형과 전류 파형이 같은 형태의 변화를 나타내는 것으로서 저항 부하 사용시 전압과 전류의 위상이 일치하고, 전동기와 같은 유도성 부하의 전류는 위상이 전압에 뒤지게 되는 것을 말한다. 비선형 부하는 전압 파형이 전류파형이 다른 형태를 나타내는 것으로 컨버터와 같은 전력변환장치가 이에 해당된다[2,3,4].

그림 1은 3상 4선식 선로의 구성도로 3상 선로에 유도전동기 외 같은 선형부하와 및 3상 유도전동기를 속도 조절하기 위해 설치하는 인버터와 같은 비선형 부하가 연결되어 사용될 수 있고, 3상의 각 상에 단상의 선형 및 비선형 부하를 연결할 수 있다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Gangneung-wonju National University, Korea.
E-mail: jgkim@gwnu.ac.kr

* Graduate School of Industrial Technology, Gangneung-wonju National University, Korea.

Received : April 5, 2017; Accepted : June 28, 2017

2.2 전류 고조파와 왜형률

고조파(harmonics)란 주기적 복합파의 각 성분 중 기본파 이외의 것을 말하며 주로 비선형 부하인 전력 변환 장치의 에너지 변환과정 중에 발생한다[1~4]. 이러한 전류 고조파의 차수는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 p 는 정류 소자의 개수이고, n 은 정수이다.

즉, 단상 전파정류기의 경우 식 (1)에 따를 경우 3차와 5차 고조파가 발생하게 된다.

비선형 부하에서 발생하는 전류는 식 (2)와 같이 기본파 성분 I_1 외 고조파 성분인 I_h 의 합으로 표시할 수 있다.

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

식 (2)와 같이 비선형 부하에서 발생하는 전류는 고조파가 포함되어 있어 이를 기본파와 비교하여 전류 고조파 왜형률(I_{thd})은 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$I_{thd} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_1} \tag{3}$$

2.3 전류 불평형률과 설비 불평형률

그림 1과 같이 3상 4선식에서 단상 또는 3상의 선형 및 비선형 부하가 연결된 상태에서 운전중이거나 운전하지 않을 경우 상별 전류가 다르고, 고조파 성분에 의해 중성선에도 전류가 흐르기 때문에 상별 설비 용량도 달라진다.

선형 및 비선형 부하의 사용으로 각 상에 흐르는 전류의 크기

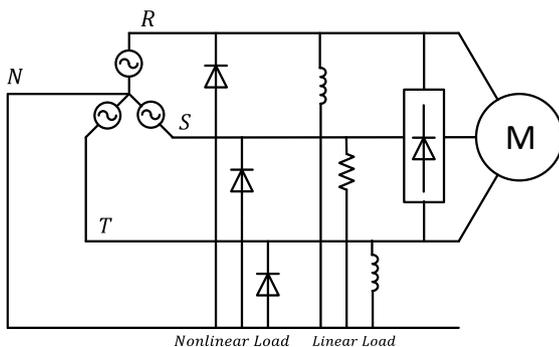


그림 1 3상 4선식 선형 및 비선형 설비 구성도
 Fig. 1 3-phase 4-wire linear & non-linear load wiring diagram

차이를 나타내는 전류 불평형률(CUF, Current Unbalance Factor)은 식 (4)와 같이 각 상에 흐르는 전류의 합과 최대 및 최소의 차이로 표현할 수 있다[6].

$$CUF = \frac{3[\max(|I_1|, |I_2|, |I_3|) - \min(|I_1|, |I_2|, |I_3|)]}{(|I_1| + |I_2| + |I_3|)} \tag{4}$$

또한 3상 4선식에서 전류 불평형에 대해 부하 불평형률(LUF, Load Unbalance Factor)은 설치되어 있는 부하의 정격 또는 상별 설비 용량을 이용하여 식 (5)와 같이 표현할 수 있다[6,7].

$$LUF = \frac{3[\max(S_1, S_2, S_3) - \min(S_1, S_2, S_3)]}{(S_1 + S_2 + S_3)} \tag{5}$$

여기서, S_1, S_2, S_3 은 각각 상에 연결된 피상전력이다.

설비 불평형률을 계산할 경우에 부하 변동에 따른 전압 및 전류의 변동을 고려하지 않고 설치되어 있는 부하의 정격이나 설비 용량만을 근거로 계산하고 있다. 국내의 경우 3상 4선식의 설비 불평형률은 용량의 기준으로 하여 30% 이하가 되도록 권고하고 있다[5]. 실제 부하의 운전 조건이나 비선형 부하 사용 등에 따른 변수를 고려하지 않아 정확한 부하 및 전류 불평형을 구하기 어렵다. 따라서 정확한 전류 및 부하 불평형을 계산하기 위해서는 실제 운전 중인 설비에서 고조파 성분이 포함된 각상의 전압과 전류를 고려하여야 한다.

3. 측정 및 결과 분석

3상 4선식에서 고조파 전류성분이 포함되지 않은 경우와 비선형 부하에 의해 고조파 전류성분이 포함된 경우의 전류 불평형률과 부하 불평형률의 크기를 분석하기 위해 3상 비선형 부하, 단상 선형 및 비선형 부하의 운전 조건을 표 1과 같이 단상 선형만 사용한 경우, 단상 선형부하와 단상 비선형 부하를 사용한 경우 그리고 단상 선형 및 비선형에 3상 비선형 부하가 가능한 3가지 경우를 각각 선정하여 3상 4선식 선로에 연결한 상태에서 발생 가능한 불평형률을 확인하기 위해 시뮬레이션과 및 측정을 실시하였다.

표 1에 제시된 부하 조건에 대해 전압, 전류, 전류 및 부하 불평형률 그리고 전류 고조파 왜형률은 전자계과도 해석 프로그램 [8]시뮬레이션 하였으며, HIOKI사의 전력품질분석기로 측정하여 분석하였다.

다음은 표 1에 제시된 3가지 조건에서 운전했을 경우에 대한 측정 및 분석 결과를 나타낸 것이다.

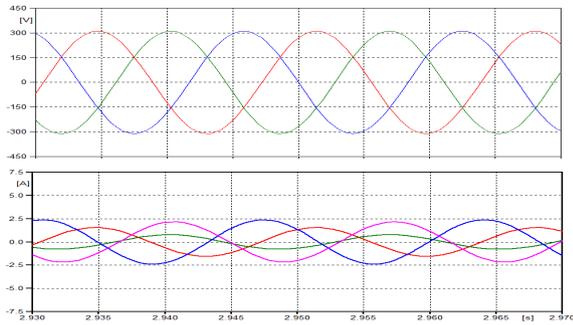
3.1 조건 I 운전시

그림 2는 3상 4선식에서 각 상에 선형 부하만 연결한 상태에서 시뮬레이션과 측정된 전압 및 전류를 가지고서 전류 및 부하 불평형률을 계산하였다.

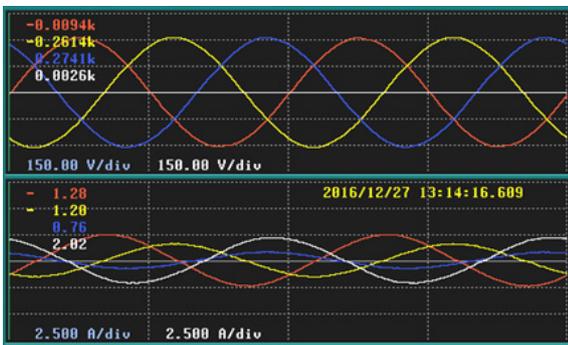
표 1 운전조건

Table 1 Operation conditions

Conditions	Used load	Parameters	Remark
I	1ph linear	R phase: R=108Ω, L=0.193H	
	"	S phase : R=200Ω	
	"	T phase : R=400Ω	
II	1ph linear	R phase : R=108, L=0.193H	
	1ph nonlinear	S phase : R=200Ω	
	"	T phase : R=400Ω	
III	1ph linear	R phase: R=108, L=0.193H	Con II +ASD
	1ph nonlinear	S phase : R=200Ω	
	1ph nonlinear	T phase : R=400Ω	
	3ph nonlinear	ASD(2.2kW)	



(a) 시뮬레이션 전압, 전류 파형



(b) 전압 전류 측정 파형

그림 2 조건 I의 전압 & 전류 파형

Fig. 2 Voltage & current waveform of condition I

그림 2와 같이 시뮬레이션 값과 측정한 전압 전류 파형을 보면, 선형부하의 사용으로 부하의 크기에 따라 전류 크기만 다를

뿐 전압과 전류 모두 정현파에 가깝다. 그림 3 (a)~(h)는 이러한 전류 파형을 FFT 분석을 통해 시뮬레이션한 것과 측정결과를 차수별로 비교한 것이다. 선형부하만을 사용하고 있기 때문에 R, S, T상 모두 기본과 전류만 존재하고 있음을 알 수 있다.

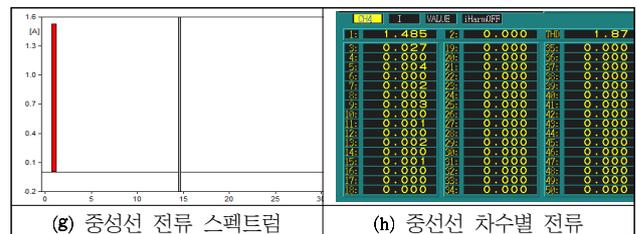
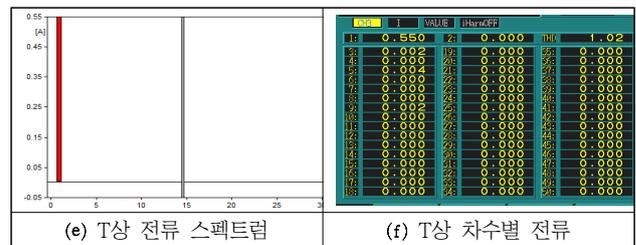
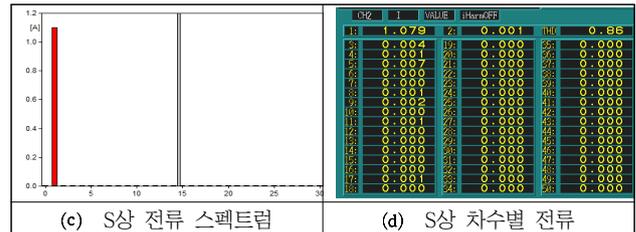
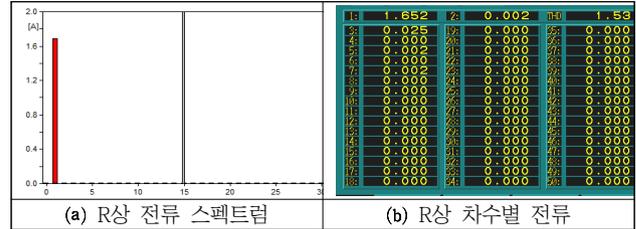


그림 3 조건 I의 전압 & 전류 크기

Fig. 3 Voltage & current magnitude of case I

그림 3의 (i)에서는 측정된 상별 전압과 전류의 크기를 나타낸 것으로 상별 부하 임피던스의 크기에 따라 전압과 전류는 서로 반비례 관계를 나타내고 있다. 3상 4선식에서 부하의 크기가 서로 다를 경우 중성선에도 꽤 높은 전류(I4)가 흐른다는 것을 알 수 있다. 3상의 각 상에 단상 선형부하만 연결하고 측정된 전류를 식 (4)에 대입하여 계산할 경우 전류 불평형률은 100.8%로

매우 높은 편이다. 그림 3(i)의 측정된 전압과 전류 값을 식 (5)에 대입하여 구한 설비 불평형률은 99.6%로서 전류 불평형률과 매우 가깝다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 상별 부하용량에 큰 차이가 날 경우 설비불평형률은 3상 4선식에서의 허용범위를 매우 초과하게 된다.

3.2 조건 II 운전 시

그림 4는 3상중에서 한상에는 선형 부하를 연결하고, 다른 두 상에는 비선형 부하를 연결한 상태에서 시뮬레이션 및 측정한 전압 및 전류값을 가지고서 전류 및 부하불평형률을 분석하였다.

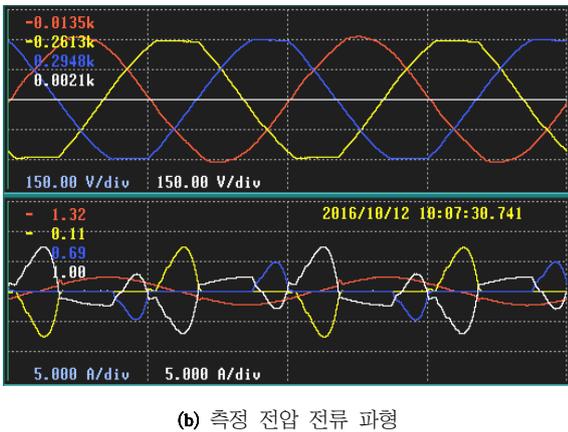
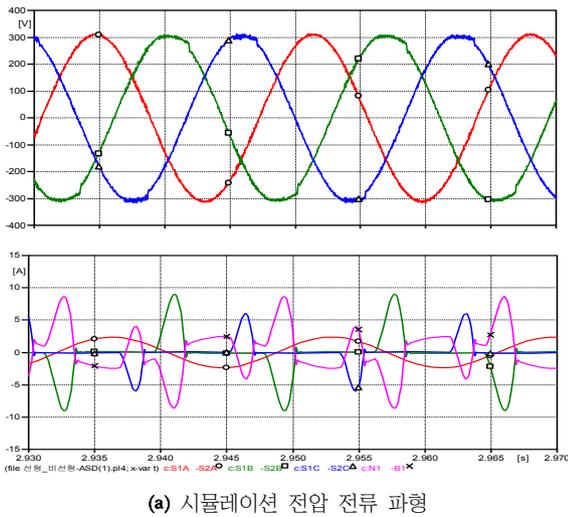


그림 4 조건 II의 전압 & 전류 파형
Fig. 4 Voltage & current waveform of case II

그림 4는 조건 II를 운전했을 때의 전압, 전류 파형으로 조건 I와 달리 S상과 T상에 선형부하를 비선형 부하로 바꾼 것이다. 비선형 부하를 연결한 S상과 T상의 전압에는 플랫 탑(flap top) 현상과 함께 고조파 성분이 포함된 왜형된 전류파형이 나타났고, 선형부하가 연결된 R상에는 정현파에 가까운 전압 및 전류가 나

타고 있다. 중성선의 전류는 3상의 각 상전류가 전부 더해진 것이 나타나고 있다. 이런 전류 파형을 FFT 분석과 측정을 통해 차수별로 분석한 것을 그림 5 (a)~(h)에 나타내었다.

그림 5 (a)~(h)에서 단상 선형부하를 사용한 R상에는 기본과 전류 이외의 고조파 전류는 나타나지 않지만, S상과 T상에는 비선형 부하의 영향으로 고조파 전류가 함유되어 있음을 알 수 있다. 이런 운전조건에 대한 전류 왜형률을 구하면 선형 부하를 사용한 R상은 4.85%로 매우 낮지만, S상과 T상은 각각 101.65%와 117.03%로 매우 높게 나타나고 있다. 그림 5(θ) 와 (h)의 경우 단상 비선형 부하의 사용으로 중성선에 흐르는 3고조파 전류는 기본과 전류보다 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 중성선의 전류 고조파 왜형률은 185.62%로 상별 전류 왜형률보다 더

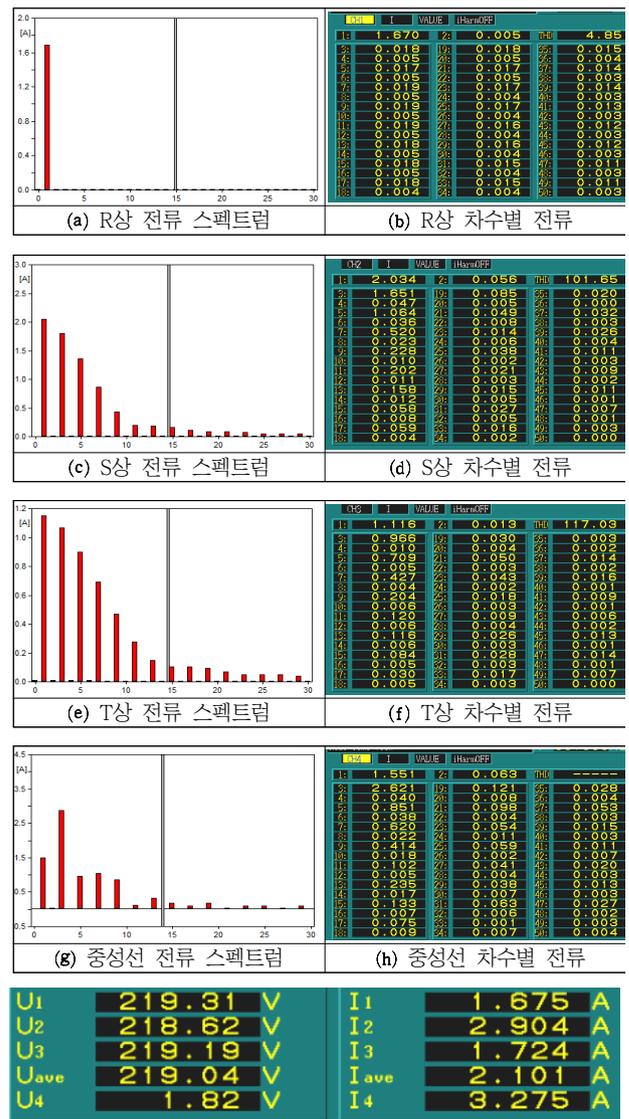


그림 5 조건 II의 전압 & 전류 크기
Fig. 5 Voltage & current magnitude of case II

높게 나타남을 알 수 있다. 그림 5(i)는 3상 4선식의 상전압, 상 전류 그리고 중성선의 상전압과 상전류의 측정값을 나타낸 것이다. 상별 전압은 부하의 크기에 따라 전압과 전류에 약간의 차이가 나므로 전류불평형률을 계산할 경우 58.5%이고, 설비 불평형률 공식에 대입하면 58.2%로 전류불평형률과 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있다. 이와 같은 운전조건에서 운전하는 경우에도 3상 4선식의 설비불평형률 30% 허용범위를 초과하고 있다.

3.2 조건 III 운전 시

그림 6은 3상 4선식에서 3상의 한상에만 선형 부하를 연결하고, 다른 두상에는 각각 단상 비선형 부하 그리고 3상 비선형 부하인 ASD를 연결한 상태에서 운전한 경우 전압 및 전류로부터 부하 및 전류불평형률 분석하였다.

그림 6은 조건 III으로 운전했을 때 ASD의 사용으로 전체적으로 전압 및 전류 파형은 왜형되어 있고, 단상 비선형 부하를 사용한 S, T상에서와 같이 전압에 플랫 탑 현상이 나타났다. 전류 파형은 FFT 분석 결과 그림 7 (a)~(h)와 같이 ASD의 사용으로

($6n \pm 1$)에 해당하는 고조파 전류가 증가함과 동시에 기본과 전류 또한 같이 증가하였다. R상에는 선형부하에 ($6n \pm 1$)에 해당하는 차수의 전류로 고조파 왜형률은 52.4%로 단상 선형부하만 사용했을 때 보다 증가하였지만, S와 T상은 단상 비선형 부하에 3상 비선형 부하가 추가된 것으로 기본과 전류성분이 고조파 전류보다 더 높아 전류 고조파 왜형률은 각각 33.7%, 44.9%로 R상에 비해 오히려 감소하였다. 또한 중성선은 ASD에서 발생하는 고조파 전류와 단상 비선형 부하에 의한 영향으로 고조파 전류가 전체적으로 증가하기 때문에 전류 고조파 왜형률은 239.4%로 매우 높게 나타나고 있다.

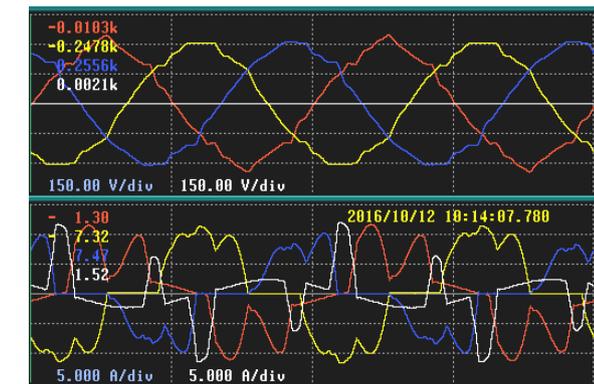
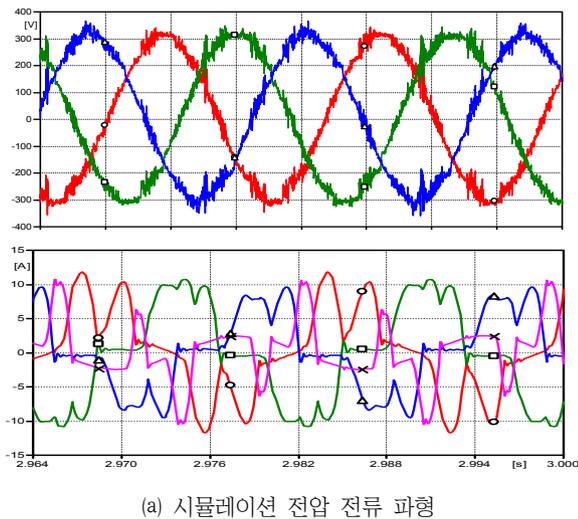
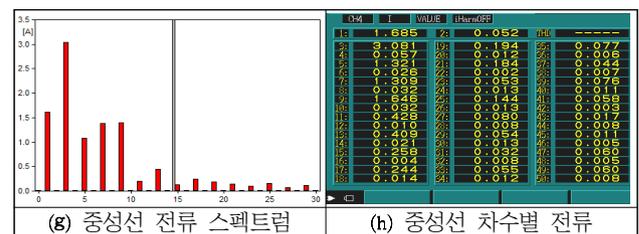
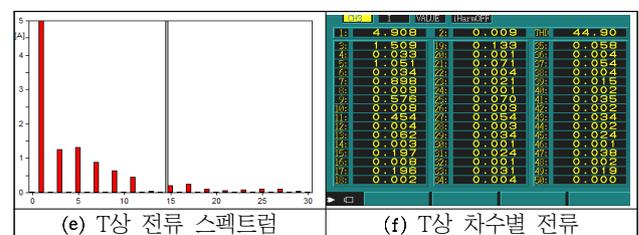
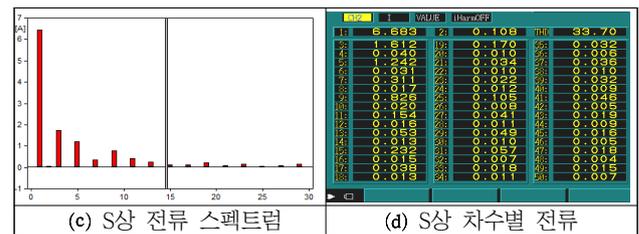
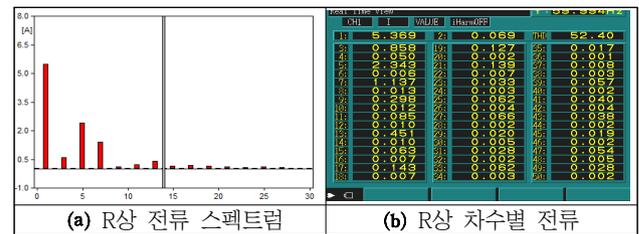


그림 6 조건 III의 전압 & 전류 파형
Fig. 6 Voltage & current waveform of case III



U ₁	218.53 V	I ₁	6.067 A
U ₂	217.19 V	I ₂	7.057 A
U ₃	217.37 V	I ₃	5.386 A
U _{ave}	217.70 V	I _{ave}	6.170 A
U ₄	0.00 V	I ₄	4.384 A

(i) 상별 전압 전류 크기

그림 7 조건 III의 전류 분석 크기
Fig. 7 Current analysis result of case III

그림 7의 (i)는 상별 전압과 전류의 크기를 나타낸 것으로서 단상 선형 및 단상 비선형부하만을 사용했을 때 보다 3상 비선형 부하의 추가로 인해 상별 전류의 크기에 차이가 줄어들기 때문에 중성선에 흐르는 전류도 상전류와 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 그래서 각 상에 흐르는 전류를 식 (4)를 이용하여 불평형률을 계산할 경우 27.1%로 조건 II의 경우보다 매우 낮아짐을 알 수 있다. 각상의 전압과 전류를 곱하여 계산한 설비불평형률은 29.38%(26.9%)로 전류불평형률과 거의 유사한 결과를 나타내고 있다. 이 결과는 3선 4선식 설비불평형률의 허용범위 안에 드는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 3상 4선식 선로에서 각 상에 단상 선형 및 비선형 부하와 3상 비선형 부하를 각각 조합 연결한 경우에 고조파 성분이 포함된 상태에서 상별 전류의 크기차이에 따른 불평형률을 비교하기 위해 전압과 전류를 시뮬레이션과 측정을 통해 전류 및 부하불평형률을 비교 분석하였다.

3상 4선식 배전선로의 각상에 단상 선형부하만 연결한 경우(조건 I)와 상별 전류의 크기에 차이가 많아 전류 및 부하불평형률이 높고, 단상 비선형부하와 단상 선형부하를 혼합하여 사용한 경우(조건 II)에는 전류 고조파 왜형률은 높으나 고조파 전류 중에서 3고조파 전류가 중성선에 흘러 상전류의 실효치 전류가 줄어들기 때문에 전류 및 부하불평형률이 조건 I에 비해 상대적으로 낮아짐을 확인할 수 있었다. 단상 선형 및 비선형 부하가 운전하고 있는 조건에서 3상 비선형 부하가 추가되어 운전하는 조건(조건 III)에서는 조건 II에 3상 비선형 부하를 선로에 추가하여 운전할 때 발생한 측정된 것으로 중성선 전류 고조파 왜형률이 가장 높게 나타내지만, 전류 및 부하불평형률은 다른 두가지 조건에 비해 오히려 낮게 나타남을 확인할 수 있었다.

본 연구는 향후 3상 4선식에서 비선형 부하를 고려한 설비의 균등 배분을 통해 부하 불평형률을 줄이는데 도움이 될 것으로 판단된다.

References

- [1] Jong-gyeum Kim et al., "Analysis on the Harmonic Characteristics of Nonlinear Load Operated by Unbalance Voltage" KIEE, Vol. 52B, No. 10, pp. 491~500, 2003.10
- [2] Jong-gyeum Kim et al., "Variance of Harmonics Element due to Linear & Non-linear Load Quantity", KIEE, Vol. 51B, No. 8, pp. 441~448, 2002
- [3] Roger C. Dugan et al., "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill, 2002
- [4] Power System Harmonics. Arrillaga, Watson. John Willey and Sons 2003.
- [5] Korea Electric Association. Consumer's Electrical Installation Guide, No. 115-1, "Limit of unbalanced load".

2016

- [6] Jong-gyeum Kim, "A New Analysis for Load Unbalance Factor" KIEE, Vol. 55P, No. 2, pp. 67~72, 2006.6
- [7] Jong-gyeum Kim et al., "The Comparison Study for Voltage, Current and Load Unbalance Factor", KIEE Vol. 54P, No. 2, pp. 88~93, 2005.6
- [8] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.

저 자 소 개

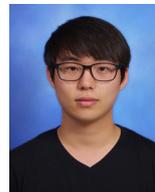


김 종 겐 (Jong-Gyeum Kim)

1961년 10월 3일생. 1996년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1987.1~1988.1 KT 근무. 1988.1~1996.3 K-water 근무. 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 전기학회 평의원. 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