

3상 4선식 부하설비의 전압, 전류 및 부하 불평형을 측정 분석

김 종 겸, 박 영 진, 이 동 주, 이 종 한, 정 종 호, 이 은 웅
 원주대학, 원주대학, 충남대학, 충남대학, 충남대학

The measurement & Analysis of Voltage, Current and Load Unbalance Factor at Three Phase Four Wire Load System

Kim Jong-Gyeum, Park Young-Jeen, Lee Dong-Ju, Lee Jong-Han, Jeong Jong-Ho, Lee Eun-Woong
 Won Ju College, Won Ju College, Chung Nam Univ, Chung Nam Univ, Chung Nam Univ, Chung Nam Univ

Abstract - This paper presents a scheme on the characteristics of voltage and current unbalance factor under the load variation at the three phase 4-wire system. The voltage unbalance factor of the three-phase 4-wire system is approved by the field measurement. This system is composed of three one-phase transformer with each other capacity. Current unbalance factor is measured by the power quality measurement apparatus and compared by the load unbalance factor. Each phase has an impedance each other by the unbalanced load operation pattern and give rise to voltage unbalance.

1. 서 론

우리나라 일반 저압 수용가에 공급되는 전압방식은 단상 2선식, 3선식 또는 3상 3선식에서 현재는 전동 및 동력부하를 동시에 사용할 수 있는 3상 4선식 220/380V 방식을 주로 사용하고 있다. 공장과 같은 일정한 부하에 안정적인 전원을 공급하기 위해 동력부하는 대부분이 380V 전원공급을 사용하고 있고, 단상부하의 경우는 같은 3상 4선식 방식을 사용하되 전용의 독립된 변압기를 사용하여 전원을 공급하고 있다. 그러나 저압 소용량의 부하를 사용하는 수용가의 경우에는 단상 및 3상 부하의 운전을 위해 하나의 변압기를 이용하여 전원을 공급하고 있다.

변압기 2차측에서 분전반을 통해 부하에 전원을 공급하기 위해 3상 4선식 배전설계시 각상에 흐르는 전류가 거의 일정하도록 설계하지만, 실제 부하의 운전패턴에 따라 각상에 흐르는 전류의 변화는 많은 차이가 발생할 수 있다. 전류의 변화시 전압의 변화로 이어지기 때문에 여러 가지 부작용을 초래할 수 있다. 그래서 부하의 불평형에 대한 범위를 정하고 있지만, 실제 운전시에는 이 범위를 초과하는 경우도 발생한다. 설비불평형율의 경우 설계시에 적용하는 것으로 운전시에는 다소 차이가 발생할 수 있으므로 운전시에 부하의 불평형율에 대한 결과 산출이 필요하다.

본 논문에서는 전원전압은 일정하게 정한다음 3상 4선식 선로에 연결된 부하의 운전조건 변화에 따라 발생하는 불평형율에 대한 측정과 분석을 실시하고자 한다.

2. 전압 및 부하불평형율

2.1 전압불평형의 발생 및 정의

우리나라 배전용 변압기의 결선은 Y-Y방식을 채택하고 있다. 이 방식은 단상 및 3상 부하에 동시에 전원을 공급할 수 있는 장점도 있지만 각 상에 걸리는 부하가 불평형일 경우 변압기 단자에 심한 전압불평형을 발생시킬 수 있다.

배전시스템에서 많은 부하는 3상 및 단상부하의 결합으로 이루어져 있다. 혼용부하의 공급을 위해서는 비대칭 변압기 뱅크 구성이 이루어지고 있다. 우리나라의 배전시스템은 저압부하의 공급을 위해 Y-Y 결선의 접지방식을 이용하고 있다. 이와 같은 부하공급 시스템에서 단상 변압기 연결, 선택된 변압기의 임피던스와 불평형 부하의 운전은 뱅크 구성에 따라 2차측 3상 전압 불평형을 발생시킬 수 있다.

전압불평형(VUF: Voltage Unbalance Factor)은 식 ①과 같이 대칭좌표법에 의해 정상분(V_1)에 대해 역상분(V_2)의 비율로서 정의한다[1-5].

$$VUF = \frac{V_2}{V_1} \times 100[\%] \quad \text{①}$$

3상 불평형 선간전압 V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} 를 정상분 V_1 과 역상분 V_2 의 대칭성분으로 변환하여 구하는 경우에 비해 현장에서 측정을 통해 쉽게 분석할 수 있는 전압 불평형율을 구하는 공식은 식 ②와 같다.

$$VUF = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100[\%] \quad \text{②}$$

식 ②에서 β 는 다음과 같다.

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

2.2 부하 및 전류 불평형율

그림 1은 단상 및 3상 부하에 전원을 공급할 수 있는 3상 4선식 전원공급 시스템의 구성도로서 전원측은 항상 일정한 전원을 공급할 수 있도록 정전압 공급장치를 이용하였고, 부하측은 단상부하는 각 상과 중성선에 각각 연결하였으며, 3상 전원도 부착하였다.

부하의 불평형 운전에 의한 문제를 제한하기 위해 단상 3선식의 경우는 40%이내, 3상 3선식 및 4선식에서 30% 이내로 제한하고 있다[6].

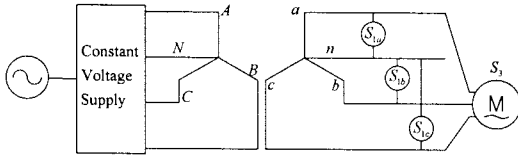


그림 1. Y-Y 결선부하시험장치 구성도

부하실비의 불평형율(LUF: Load Unbalance Factor)은 식 3과 같이 총부하실비용량 평균치에 대해 각 선간에 접속하는 단상 부하 총실비용량(VA)의 최대와 최소 차의 비로 표현하고 있다.

$$LUF = \frac{3[\max(S_{1a}, S_{1b}, S_{1c}) - \min(S_{1a}, S_{1b}, S_{1c})]}{S_3 + S_{1a} + S_{1b} + S_{1c}} \quad (3)$$

전압불평형율은 부하의 운전패턴에 따라 큰 차이가 있고, 부하의 불평형은 전류의 불평형과 밀접한 관계가 있지만, 현재 규정되어 있는 부하불평형율은 운전시간의 변화를 고려하지 않고 있다. 따라서 정확한 부하불평형의 산출을 위해서는 현장의 운전상황을 고려한 전류에 의한 부하불평형율의 산출이 필요하다.

시간대별로 변동하는 부하의 운전상황을 고려한 불평형율을 산출할 수 있는 전류불평형율(CUF)은 전압불평형율과 같이 식 4로 산정할 수 있다.

$$CUF = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\delta}}{1 + \sqrt{3 - 6\delta}}} \quad (4)$$

식 4에서 δ 는 다음과 같이 각 상의 전류로 표현된다.

$$\delta = \frac{|I_a|^4 + |I_b|^4 + |I_c|^4}{(|I_a|^2 + |I_b|^2 + |I_c|^2)^2}$$

부하불평형율의 공식은 그림 1에서와 같은 회로로부터 식 4와 같이 구해진다. 식 3은 피상전력에 의해 불평형율을 구하지만, 식 4는 부하에 공급되는 전류 실효치로 불평형율을 구하기 때문에 식 4에 의한 값이 식 3에 의해 구한 값보다는 약간 낮은 값을 나타내지만, 보다 정확한 부하의 운전상황을 확인할 수 있다.

그림 2는 그림 1과 같은 회로의 실제 측정도로서 단상변압기 3대로 Y-Y결선을 하였다.

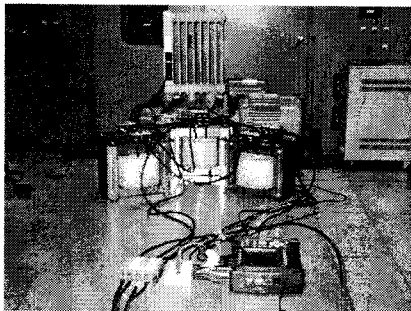


그림 2. 측정 구성도

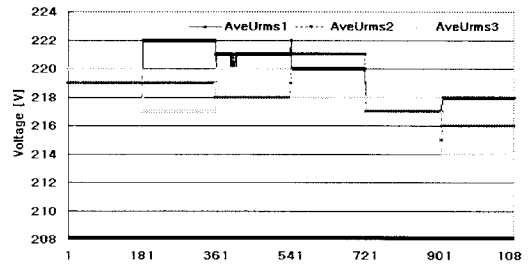
3. 측정 및 결과 분석

그림 1과 같은 측정시스템에서의 운전조합과 불평형율은 표 1과 같다. 부하의 변동에 따른 전압, 전류 및 부하의 불평형율을 구하기 위해 각상에 부하의 단독운전 및 단상과 3상의 연계운전을 통해 측정을 실시하였다. 측정장비는 HIOKI사의 3196 Power Analyzer를 이용하였고, 측정간격은 1초단위로 각 부하를 3분간 운전을 실시하였다.

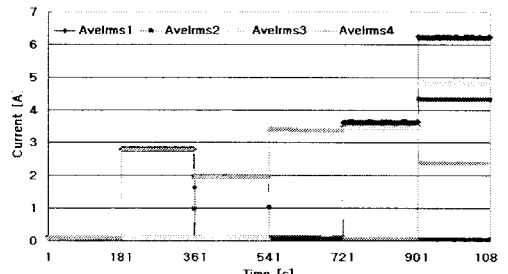
표 1 부하 운전 패턴 및 각 상 부하와 불평형율

운전 조합	각상 부하[VA]			VUF [%]	LUF [%]	CUF [%]
	A상	B상	C상			
S_{1a} 단독운전 ¹⁾	350	0	0	1.3	100	95.2
S_{1b} 단독운전 ²⁾	0	248	0	0.8	100	91.9
S_{1c} 단독운전 ³⁾	0	0	429	0.8	100	95.4
S_3 단독운전 ⁴⁾	457	435	432	0.3	5.6	4.52
$S_{1a} + S_{1b} + S_{1c} + S_3$	780	539	603	1.0	28.2	28.3

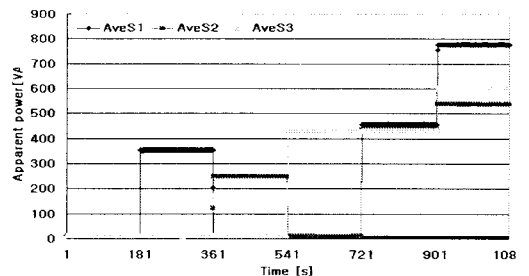
그림 2는 1과 같은 설비에 대해 표 1과 같은 운전조건의 변화로 측정된 전압, 전류, 전력 및 불평형율을 나타낸 것이다.



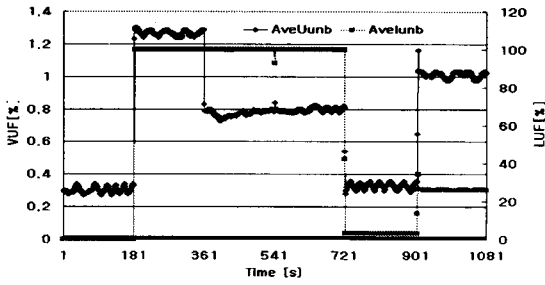
전압파형



전류파형



피상전력



전압 및 부하 불평형율
 그림 2. 측정 결과 분석 과정

그림 2에서와 같은 처음에는 무부하로 3분 동안의 전압, 전류의 변화를 확인하였다. 그림 2 (a), (d)의 처음 3분 동안에서와 같이 공급되는 전압이 평형이고 무부하인 부하에 전원이 공급되어도 연결된 케이블의 임피던스 등의 영향으로 제로에 가까운 평형율을 찾기가 어렵다. 본 측정시스템의 경우에는 무부하로 운전할 경우에 약 0.3%정도의 불평형이 발생된다.

3상 4선식 설비의 각상에 단상 부하만을 개별 운전할 경우 전압불평형율은 0.8 및 1.3%이고, 설비(부하)불평형율은 거의 100%에 가깝다. 이 경우 전압불평형율은 허용기준을 만족하지만, 부하불평형율은 허용범위를 매우 초과하고 있다. 부하를 운전하지 않고 설계시 각 상의 분담부하(피상전력)에 대한 불평형율을 구하는 식 ③에 의할 경우 3상 중 한상에만 부하를 운전할 때 불평형율은 100%이지만, 실제 부하(유효전력)의 운전시에 흐르는 전류에 의한 불평형율은 식 ④로 계산할 경우 측정된 전류값을 사용하므로 약간 낮은 값을 나타낸다.

같은 설비에 3상 부하인 유도전동기를 연결하고 단상 부하를 사용하지 않은 상태(운전조건 ④)에서 부하의 운전시 전압불평형율은 무부하에서와 같은 값을 유지하였으며, 설비불평형율도 매우 낮은 값을 나타내었다. 이와 같은 조건에서 설비불평형율이 제로가 되지 않는 것은 3상 부하의 개별상에 대한 전류값에 약간의 차이가 발생하기 때문이다.

단상 및 3상 부하를 함께 운전한 경우(운전조건 ⑤)에서 전압불평형율은 1%이고, 부하 및 전류불평형율은 거의 비슷한 값으로 28%정도가 되었다. 이 경우 부하불평형율은 3상 4선식의 허용한계 30%에 근접하지만, 높은 수치가 되는 것은 각 상에 연결된 단상 부하의 용량에 차이가 있기 때문이다.

그림 2(b)에서와 같이 단상 부하만을 개별적으로 운전할 경우(운전조건 ①, ②, ③)에 중성선에 불평형에 해당하는 전류가 그대로 흐르고 있고, 3상 부하만의 단독운전(④)에서는 중성선에 전류가 거의 흐르지 않으며, 3상 및 단상 부하의 혼합운전(⑤)에서는 불평형에 해당하는 일부전류가 중성선을 통해 흐르고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

우리나라 배전방식은 3상 4선식 22.9kV-y로 구성되어 있으며, 1차와 2차측 중성선은 공통으로 접지시키고 있

다. 대부분의 일반 수용가는 부하에 전원을 공급하기 위해 특고압을 직접 저압 220/380V 방식으로 변환시키는 3상 4선식 배전방식을 많이 사용하고 있으므로 이에 대한 부하 운전시 발생할 수 있는 전기품질에서의 문제점에 대한 대책수립의 연구결과이다.

본 연구에서는 저압설비에 대한 3상 4선식 배전시스템에서 부하의 운전패턴에 따른 전압 및 부하의 불평형율에 대한 측정결과를 나타낸 것이다. 각 상에 연결된 부하는 단상부하의 경우 단독 또는 여러 개를 사용할 수 있고, 3상 부하는 단독 또는 단상부하와 함께 사용된다.

3상 부하가 불평형일 경우 부하전류의 일부는 1차 중성선에 흐른다. 또한 변압기 여자전류의 3 고조파 성분이 1차 중성선에 흐른다. 이와 같은 이유로 중성선은 함께 묶는 것이 매우 필요하다. 이를 묶지 않을 경우 2차측에서의 상전압은 매우 불안정해진다. 즉 어느 한상에서의 부하가 다른 두상에 비해 클 경우 해당하는 상에서의 전압은 지나치게 떨어지고 나머지 두상에서의 전압은 매우 상승한다. 또한 매우 높은 3고조파 전압이 라인 및 중성선 사이에 나타난다. 이는 규정된 실효치 전압에 대해서 피크 전압이 순수한 60Hz 전압에 비해 매우 높다는 것을 의미한다. 이는 변압기와 2차측에 연결된 모든 기기에 지나친 스트레스로 작용한다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 산업자원부 및 한국전력공사의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. Pillay and M. Manyange, "Definitions of voltage unbalance", IEEE Power Eng. Rev. Mag., vol.5, pp.50-51, May 2001.
- [2] 김종겸, 이은용, "불평형 전압으로 운전시 비선형 부하에 나타나는 현상", 대한전기학회 논문지(B), 제 51권, 6호, p. 285-291, 2002.6
- [3] 정중호외 3인, "전압불평형율의 현장 측정 및 분석", 대한전기학회 논문지(P), 제 54권, 1호, pp.41-46, 2005. 3
- [4] 김종겸, 박영진, 이은용, "부하 변동에 의한 전압불평형율의 특성해석", 제 54권, 1호, pp.47-52, 2005. 3
- [5] 김종겸, 이은용, "불평형 전압으로 운전시 비선형부하에 나타나는 현상", 대한전기학회 논문지(B) 제 51권, 6호, pp.285-291, 2002. 6
- [6] 대한전기협회, "내선규정-불평형부하의 제한"제 115절