

3상 4선식 전력 시스템의 중성선 전류 분석

민준기, 김형철, 김수철, 최재호
 충북대학교 전기전자 컴퓨터 공학부

Neutral Line Current Analysis of Three-phase Four-wire Power System

Joonki Min, Hyngchul Kim, Suchel Kim, Jaeho Choi
 School of Electric & Computer Eng. Chungbuk Univ.

ABSTRACT

Neutral line current is analyzed by the neutral line CF in nonlinear load balanced and unbalanced conditions. The worst nonlinear load condition is nonlinear balanced load condition. and It is below $CFNL=1.194$ that a neutral line current could not exceed the rated value

1. 서 론

다이오드 정류기 부하와 같은 비선형 부하에 의해 고조파 전류가 발생하게 된다. 이러한 고조파 전류 중 각 상에서 발생되는 3차 고조파 전류는 중성선에서 중첩되어 과도한 크기의 중성선 전류^[1]가 발생하게 된다.

이러한 과도한 중성선 전류에 의하여 중성선의 과열 및 소손, 열화에 의한 변압기의 소손 및 수명 단축, 중성선 전위 발생으로 인한 중성선을 공유하고 있는 다른 부하와의 간섭현상^[2], 부하의 전압 왜형을 증가, 역률 증가와 같은 문제점^[3]이 발생하게 된다.

3상 4선식 전력시스템에서 중성선 전류는 각 상 전류의 합으로 정의된다. 각 상의 기본파 전류와 3배수차 전류 고조파를 제외한 고조파 전류성분은 평형부하조건일 경우 중성선에서 위상차에 의해 상쇄되지만, 각 상의 3배수 고조파 전류성분은 중성선에서 중첩되어 합의 형태로 나타나게 된다. 그래서 중성선 전류 정격 값을 넘는 중성선 전류가 흐르는 경우가 발생하게 된다. 중성선에 정격값을 초과하는 전류가 흐를 경우 중성선과 변압기의 열화를 유발하게 되고 이러한 문제가 지속되면 전력 공급이 중단되는 문제까지 초래할 수 있다. 그러므로 중성선 전류를 정격 값 이하로 흐르게 하는 보상 장치가 필요하다. 중성선 전류를 보상하기 위해서는 먼저 중성선 전류에 대한 분석이 필요하다.

본 논문에서는 다이오드 정류기와 같은 비선형 부하에 의해 발생하는 중성선 전류 분석하기 위하여 중성선 전류 CF를 도입하여, 비선형 부하의 평형 및 불평형 조건에서 중성선 CF 값에 따라 중성선 전류가 중성선 정격값 초과 정도를 해석적으로 보였다.

2. 중성선 전류

2.1 중성선 전류

중성선 전류는 3상 4선식 전력시스템에서 중성선에 흐르는 전류를 말하여 선형부하 일때는 불평형 전류로 정의되며 비선형 부하일때는 중성선 전류라 정의된다. 이러한 중성선 전류는 식 1과 같이 정의 된다.

$$i_N = i_a + i_b + i_c \quad (1)$$

선형부하에서 발생하는 불평형 전류는 부하 평형 상태에서는 0가 되고, 부하 불평형 상태에서 가장 큰 불평형 전류가 흐르는 경우는 한 상에 부하가 있고 나머지 두상이 무부하 상태인 경우이다. 그러므로 각 상의 위상선과 중성선의 전선 굵기가 동일한 경우 위상선에 흐르는 전류가 정격 값을 초과하지 않는 이상 중성선 흐르는 전류도 정격값을 초과하지 않게 된다.

그러나 비선형 부하에서의 중성선 전류는 각 상에 포함되어 있는 3배수차 전류에 의해 중성선 전류의 크기가 영향을 받는다. 이것을 비선형 평형 부하 조건과 비선형 불평형 부하 조건으로 나누어 분석할 수 있다.

전류 고조파가 포함된 각 상의 전류를 수식으로 나타내면 식 2와 같다.

$$\begin{aligned} i_{La} &= I_1 \sin \omega t + I_3 \sin 3\omega t + I_5 \sin 5\omega t + I_7 \sin 7\omega t + I_9 \sin 9\omega t + \dots \\ i_{Lb} &= I_1 \sin (\omega t - 2\pi/3) + I_3 \sin 3(\omega t - 2\pi/3) + I_5 \sin 5(\omega t - 2\pi/3) \\ &\quad + I_7 \sin 7(\omega t - 2\pi/3) + I_9 \sin 9(\omega t - 2\pi/3) + \dots \\ i_{Lc} &= I_1 \sin (\omega t + 2\pi/3) + I_3 \sin 3(\omega t + 2\pi/3) + I_5 \sin 5(\omega t + 2\pi/3) \\ &\quad + I_7 \sin 7(\omega t + 2\pi/3) + I_9 \sin 9(\omega t + 2\pi/3) + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

이때, 발생하는 중성선 전류는 식 1과 같이 정의되므로, 비선형 평형부하 조건에서 3배수차 고조파 전류 이외의 성분은 중성선에서 상쇄되므로, 중성선 전류는 식 3과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_N = 3I_3 \sin 3\omega t + 3I_9 \sin 9\omega t + 3I_{15} \sin 15\omega t + \dots \quad (3)$$

2.2 중성선 전류의 분석

비선형 부하 평형 조건에서 중성선 전류는 3배수차 전류 고조파의 합으로 정의되고, 비선형 부하 불평형의 경우에는 기본파 주파수를 가지는 불평형 전류와 3배수차 고조파 전류의 합으로 정의된다. 중성선 전류의 발생은 4가지 형태로 정리할 수 있다.

첫 번째 선형부하 평형의 경우 불평형에 의한 중성선 전류는 발생하지 않는다. 두 번째 선형부하 불평형의 경우, 부하 불평형에 의한 중성선 전류가 발생하게 된다. 세 번째 비선형 부

하 평형의 경우 기본파의 3배수차 주파수를 가지는 중성선 전류가 발생하게 된다. 네 번째 비선형 부하 불평형의 경우, 부하 불평형에 의한 기본파 주파수 성분의 전류와 3배수차 주파수 성분의 전류가 합쳐진 중성선 전류가 발생하게 된다.

중성선 전류에 의해 발생하는 문제의 대부분은 중성선 전류가 중성선 전류 정격값을 초과함으로써 발생된다. 그러므로 선형부하 조건에서는 중성선 전류에 의한 문제가 발생하지 않음을 알 수 있다. 그리고 비선형 부하 조건에 대해서 각 상 전류의 3배수차 고조파 전류 성분으로 중성선에 흐르는 전류의 중성선 전류 정격 초과 여부를 평가 할 수 있는 기준이 필요하다. 다시 말하면 전기 기구나 전기기기에서 발생하여 중성선 전류는 만들어 내는 3차 고조파 전류의 제한값을 어디까지 해야 하는 가에 대한 적절한 기준이 필요하다.

CF(crest factor)의 크기를 결정하는 전류의 최대값은 위상선에 존재하는 고조파 전류에 의해 보다 큰 값을 가지게 되지만, 중성선 전류는 3배수차 고조파 전류를 제외한 고조파 전류 성분은 위상차에 의해서 상쇄되어, 중성선에는 3배수차 고조파 전류 성분만이 존재하게 된다. 각 상의 3배수차 고조파 전류의 중첩으로 중성선 전류가 발생하게 되므로, 3배수 고조파 전류에 대한 중성선 CF를 도입한다.

이러한 3배수차 고조파 전류에 대한 CF를 도입함으로써 각 상에 포함되어 있는 3배수차 전류의 크기를 기본파 전류 크기의 비율로 얻을 수 있다. 이것은 실효값으로 정의되는 선로의 정격 용량에 대한 중성선 전류의 선로 정격 용량 초과 여부를 기본파 성분의 실효값으로 확인 할 수 있는 근거를 제시한다.

2.2.1 비선형 평형부하 조건에서 중성선 전류 분석

비선형 부하에 의해서 발생하는 중성선 전류 정격값 초과 여부를 판단하기 위해 위상선의 기본파 전류에 대한 3배수차 고조파 전류를 중성선 전류 CF로 정의하면 아래와 같다.

$$CF_{NL} = \frac{I_{3rd-peak}}{I_1 - RMS} \quad (4)$$

CF_{NL} 사용을 위한 가정은 아래와 같다

- 1) 기본파 전류와 3차 고조파 전류만 존재한다.
- 2) 최대 CF는 2.5이다.
- 3) 위상선과 중성선에 사용된 전선의 굵기는 동일하다.
- 4) 각 상의 부하는 평형이다.

이러한 가정에서 3차 고조파 전류의 크기를 기본파 성분의 크기의 비로 나타내어 각각의 경우에 대해 실효값으로 계산하면 각 상의 3차 고조파 전류의 최대값과 중성선 전류 정격값에 대한 중성선 전류의 크기의 비로 나타낼 수 있다. 이것을 표로 나타내면 표 1과 같다. 그리고 이것을 그래프로 나타내면 그림 1과 같다

표 1 비선형 평형 부하 조건에서 중성선 전류
Table 1 Neutral line current in nonlinear balanced load condition

CF_{NL}	$I_{3,MAX}$	$\frac{I_{N,RMS}}{I_{N,Rate}}$
1.914	$0.5 I_1$	1.0
2.066	$0.652 I_1$	1.2782
2.414	I_1	1.732
2.5	$1.086 I_1$	1.831
2.828	$1.414 I_1$	2.121
3.0	$1.586 I_1$	2.238

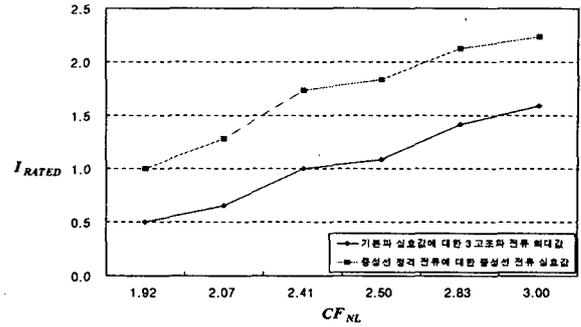


그림 1 비선형 평형 부하 조건에서 중성선 전류
Fig. 1 Neutral line current in nonlinear balanced load condition

2.2.2 비선형 불평형부하 조건에서 중성선 전류 분석

비선형 부하 불평형의 경우를 분석하기 위해서 3상 부하 회로를 식 5와 같은 방법으로 2상 부하 회로로 변환하며, 식 6과 같이 변환된 2상 회로의 두 전류 비율을 부하 불평형율로 정의한다. 이 정의에 따라 중성선 전류 CF에 의한 중성선 전류의 크기를 평가한다.

$$i_N = i_a + i_b + i_c = i_a + i_a' \quad (5)$$

$$\text{단, } i_a' = i_b + i_c$$

$$UF_{Load} = \frac{i_a'}{i_a} \quad (6)$$

선형부하 불평형 조건에서 최악의 조건은 한상에 정격부하가 걸리고 나머지 두 상에는 부하가 없는 경우이다. 이것을 비선형 불평형 조건으로 고려해 보면, 다른 상의 부하에는 오직 3배수 고조파 전류만 발생하는 경우를 가정할 수 있으나, 3배수차 고조파 전류만을 발생 시키는 부하를 가정한 것은 현실적인 일이 아니므로 고려하지 않기로 한다.

i_a' 은 기준 상을 제외한 두 상의 전류의 합으로 표현되며, 선형부하 상태에서 i_a 에 대하여 반대 위상을 가지는 기본파 전류 성분이다. 이러한 가정에서 3차 고조파 전류의 크기를 기본파 성분의 크기의 비로 나타내어 각각의 경우에 대해 실효값으로 계산하면 각 상의 3차 고조파 전류의 최대값과 중성선 전류 정격값에 대한 중성선 전류의 크기의 비로 나타낼 수 있다. 이것을 표로 나타내면 표 2와 같다. 이것을 그래프로 나타내면 그림 2와 같다.

그림 2는 일정한 CF_{NL} 값에 부하 불평형률 값의 변화에 따른 중성선 전류의 중성선 정격 전류 초과 여부를 나타낸 것이다. 3차 고조파의 크기가 기본파 전류 실효값의 1/2 일때를 의미하는 $CF_{NL}=1.914$ 의 경우 부하 불평형율의 변화에 대해서도 중성선 정격 전류를 초과하지 않았다. 하지만 3차 고조파 전류의 크기가 기본파 전류 실효값 일때를 의미하는 $CF_{NL}=2.414$ 일 때와 3차 고조파 전류의 크기가 기본파 전류의 최대값 일때를 의미하는 $CF_{NL}=2.828$ 의 경우와 3차 고조파 전류의 크기가 기본파 전류 실효값의 1.586배 일때를 의미하는 $CF_{NL}=3.0$ 의 경우는 낮은 부하 불평형율에 대해서는 중성선 전류 정격을 초과하였고, 불평형율이 높아 질수록 중성선 정격 전류값에 수렴하는 형태를 보였다. 부하 불평형율이 크다는 것은 3상에서 한 상에만 전류를 흐르는 경우를 의미하므로 타당한 결과라 할 수 있다.

표 2 비선형 불평형 부하 조건에서 중성선 전류
Table 2 Neutral line current in nonlinear unbalanced load condition

UF_{Load}	CF_{NL}	$I_{N3rd,RMS}$	$\frac{I_{N,RMS}}{I_{N,Rated}}$
1	1.914	1.0608	1.0
	2.414	2.1213	1.7321
	2.828	3.0	2.1213
	3.0	3.3639	2.2390
2	1.914	0.7072	0.8165
	2.414	1.4142	1.2248
	2.828	2.0	1.4578
	3.0	2.2426	1.5293
3	1.914	0.5893	0.8389
	2.414	1.1785	1.1056
	2.828	1.16667	1.2693
	3.0	1.8689	1.3207
5	1.914	0.4950	0.8881
	2.414	0.9899	1.0392
	2.828	1.4	1.1402
	3.0	1.5698	1.1727
7	1.914	0.4547	0.9147
	2.414	0.9092	1.0203
	2.828	1.2858	1.0927
	3.0	1.4418	1.1164
10	1.914	0.4243	0.9381
	2.414	0.8485	1.0010
	2.828	1.2	1.0607
	3.0	1.3456	1.0775
100	1.914	0.3607	0.9934
	2.414	0.7212	1.0001
	2.828	1.02	1.0051
	3.0	1.1437	1.0068
1000	1.914	0.3543	0.9993
	2.414	0.7085	1.0000
	2.828	1.002	1.0005
	3.0	1.1235	1.0007

3. 결 론

비선형 부하의 평형과 불평형 조건에 대해서 중성선 전류를 분석하였다. 이 분석에 따르면 비선형 부하조건에서의 최악의 중성선 전류 조건은 비선형 평형 부하 조건임을 수식의 유도과정 통해 밝혔다. 그리고 비선형 불평형 부하 조건에서도 중성선 전류는 불평형 정도에 따라 중성선 전류 정격값을 초과할 수 있다는 것을 밝혔다.

그리고 $CF_{NL}=1.914$ 일때, 3차 고조파 전류의 크기가 기본파 전류 실효값의 50%일때 부하 불평형의 정도와는 관계없이 중성선 전류는 그 정격값을 초과하지 않다는 것을 밝혔다.

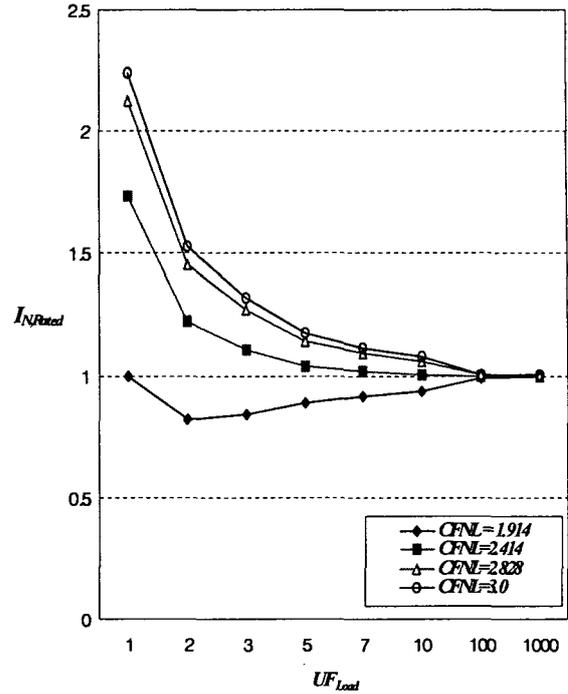


그림 2 비선형 불평형 부하 조건에서 중성선 전류
Fig.2 Neutral line current in nonlinear unbalanced load condition

참 고 문 헌

- [1] A. C. Liew, "Excessive neutral currents in three-phase fluorescent lighting circuits," IEEE Trans. Industry Applications, vol.25-4, pp.776-782, July-Aug. 1989.
- [2] T. M. Gruz, "A survey of neutral current in three-phase computer power systems," IEEE Trans. Industry Applications, vol.26-4, pp.719-725, July-Aug. 1990.
- [3] J. S. Subjak and J. S. Mcquilin, "Harmonics - causes and effect, measurements and analysis: and update," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 26-4, pp.1034-1042, July-Aug. 1990.