

중성선 공용시 3배수 고조파에 따른 문제점 분석

(A Study on the Problems of the Neutral Line Due to the 3rd Harmonic)

조남훈* · 정점수 · 박용우 · 하복남 · 이흥호

(Nam-Hun Cho · Jum-Soo Jung · Yong-Woo Park · Bok-Nam Ha · Heung-Ho Lee)

요 약

중성선 전류는 부하 불평형 전류와 3배수 고조파 전류로 이루어져 있다. 중성선 전류의 주요한 원인이 되는 3배수 고조파 전류는 단상 비선형 부하가 사용하는 단상 정류회로에 기인하며, IEC 61000-3-2의 클래스 D에 속하는 TV, 컴퓨터, 모니터가 부하전류 대 3배수 고조파 전류를 가장 많이 발생시킨다. 배전계통에 미치는 고조파 영향의 예를 보이기 위해 고조파를 고려하지 않은 중성선 공용 문제에 대해 현행 배전설비 설계기준을 살펴보고 대책을 살펴본다.

Abstract

The neutral current is made of both the load unbalanced current and the 3rd harmonic. The 3rd harmonic which is the source of the main neutral current is generated from the loads using bridge rectifier circuits on their input produce currents. TV, computer and monitor which are belong to IEC 61000-3-2 Class D are the main 3rd harmonic current sources. In order to show the affect of the distribution system by these disturbances, this paper has studied the current standards of the Korea Electric and considers the problem of the neutral common.

· Key Words : Harmonic, Propagation, Neutral line current, 3rd harmonic

1. 서 론

전기설비설계기준에는 고압 및 특고압 중성선과 저압의 중성선은 별도로 운영하는 것을 기본으로 하

고 있으며, '전기설비기술기준 135조 ②항. 5'에 따르면 "다중접지한 중성선은 저압 전로의 접지측 전선이나 중성선과 공용할 수 있다." [1]라고 중성선 공용이 예외사항으로 명시되어 있다.

이를 바탕으로 내선규정에서는 '2155-4 특별고압 중성선의 가선' 부분에서 '동일변전소에서 인출된 특별고압 배전선의 중성선은 서로 공용하며, 서로 다른 변전소에서 인출된 특별고압 배전선의 중성선은 공용하여서는 안된다.' [2]고 되어 있고, 배전설계기

* 주저자 : 한국전력공사 전력연구원
Tel : 042-865-7693, Fax : 042-865-5904
E-mail : namhun@kepri.re.kr
접수일자 : 2008년 7월 30일
1차심사 : 2008년 7월 30일
심사완료 : 2008년 8월 11일

2. 중성선 공용의 현황과 문제점

준에서 특고압의 경우 '동일 변전소에서 인출된 특고압(또는 고압) 배전선의 중성선은 서로 공용한다.' 저압의 경우 '1차측이 다중접지된 중성선은 동일 계통의 저압 중성선 또는 접지측 전선과 공용하며, 공용 중성선의 굵기 선정은 특고압 중성선의 굵기와 저압 중성선의 굵기 중 굵은 것으로 한다.'[3]라고 명시되어 있다.

배전설계기준이나 현행의 배전계통 또는 저압계통 운영에 있어 고조파가 거의 고려되지 않아 도체 규격을 초과하는 전류가 흐르고 있다. 본 논문에서는 배전계통에 미치는 고조파 영향의 예를 보이기 위해 고조파를 고려하지 않은 중성선 공용 문제에 대해 현행 배전 기준을 살펴보고 대책을 검토하였다.

현재 중성선을 별도로 사용하는 '전기설비설계기준' 대신에 '내선규정'과 '배전설계기준'에 따라 저압 중성선을 생략하여 사용한다.

중성선 공용시 3상 불평형 전류, 3배수 고조파, 저압 부하의 복귀 전류가 흐를 수 있는데 불평형 전류와 3배수 고조파는 소래변전소의 성심 DL에서 OCGR이 트립되었을 때 73[A]까지 흐른 사례가 있으며, 부하가 커짐에 따라 84[A]까지 중성선에 측정되었다.

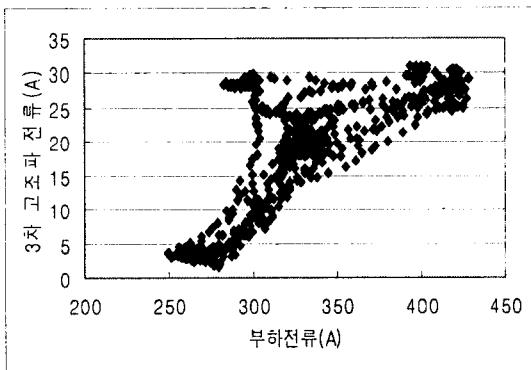


그림 1. 부산 부민변전소 MTR #2(5월)에서의 3차 고조파 산포도

Fig. 1. The measuring results of 3rd harmonic in May at BB

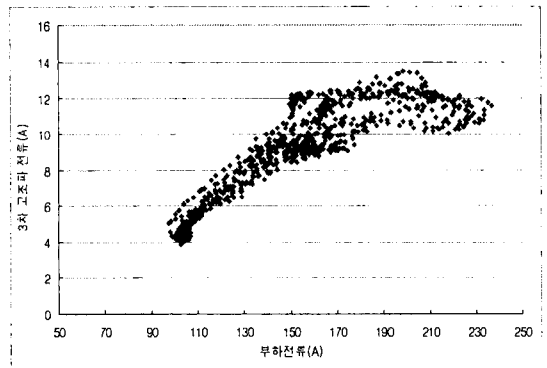


그림 3. 부천 소래 변전소의 유한 DL의 3차 고조파 산포도

Fig. 3. The measuring results of 3rd harmonic at BSY

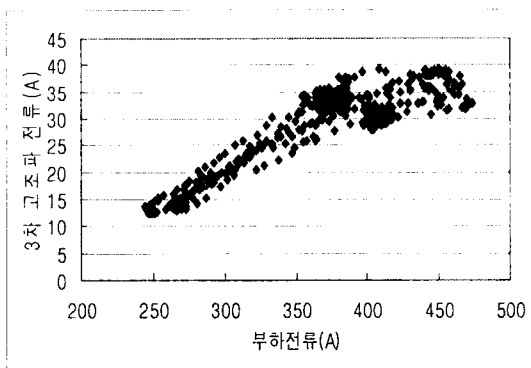


그림 2. 부산 부민변전소 MTR #2(8월)의 3차 고조파 산포도

Fig. 2. The measuring results of 3rd harmonic in Aug at BB

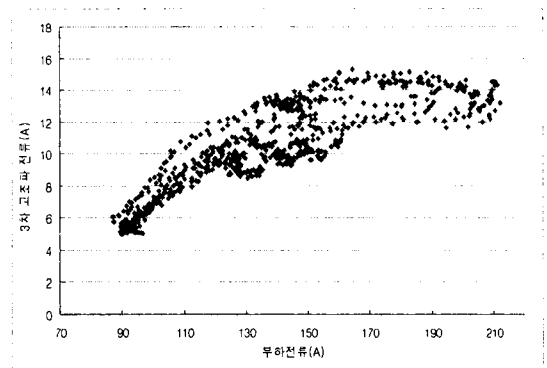


그림 4. 부천 소래 변전소의 성심 DL의 3차 고조파 산포도

Fig. 4. The measuring results of 3rd harmonic at BSS

증성선 공용시 3배수 고조파에 따른 문제점 분석

표 1. 부하에 따른 중성선 전류 추정
Table 1. Neutral current according to load

부하	R	S	T	평균	불평형률	N	3배수
9.9[MVA]	275	243	233	250	14.8[%]	72.67	57.23

증성선에 흐르는 3배수 고조파는 대부분 단상 비선형 부하에 의해서 발생하기 때문에 3상 부하 및 단상 선형 부하 증가에 따른 영향이 적다. 따라서 부하 전류가 일정수준 이상이 되면 3배수 고조파는 증가하지 않거나 포화되는 모습을 보인다. 이것은 부하 전류 대 3차 고조파에 대한 산포도를 통해 다음과 같이 확인할 수 있다.

위의 그림에서 보는 것처럼 특정 부하전류 이후에는 3차 고조파의 증가가 둔화되므로 특정 시점에서 측정된 부하전류와 3배수 고조파를 이용해 단순 배수로 다른 시점의 3배수 고조파를 예측하면 과다 추정이 될 가능성이 크므로 상관식과 같은 적절한 추정 방법이 필요하다. 여기서 증성선 불평형 전류에 대해 불평형률 30[%] 제한치를 적용할 수 있다면 보다 정확한 추정을 할 수 있겠지만 증성선 전류를 추정하는데 있어 고려하지 못하는 이유는 3상 전류의 합이 같더라도 다음의 식에서 수많은 경우의 수가 있어 I_N 의 값이 달라지기 때문이다.

$$\text{부하 불평형률(\%)} = \frac{I_N}{(I_A + I_B + I_C)/3} \times 100\% \quad \text{식(1)}$$

$$I_N = \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 - (I_A I_B) - (I_B I_C) - (I_C I_A)} \quad \text{식(2)}$$

어떤 방식을 사용하여 추정을 하더라도 대부분 OCGR 트립 전류가 84[A]로 셋팅되어 있으므로 증성선 전류는 최대 84[A]로 설정하는 것이 바람직하다.

결선방식에 따라 증성선 전류가 영향을 받으므로 전국의 주상 변압기 결선 현황과 각 결선에 따른 과부하율을 다음에 살펴보았다.

표 2. 변압기 결선방식별 분포
Table 2. Data of the transformer's connection

변압기 결선방식	공급 지역 별 변압기 수(1999년)				
	결선	변화가	주택가	농어촌	합계(비율[%])
1상2선식(110[V])	11	0	0	0	0(0)
1상2선식(200[V])	12	56	355	0	411(0.03)
1상2선식(220[V])	13	8,451	69,592	186,859	264,902(21.63)
1상3선식(110/220[V])	21	17,431	94,293	13,415	125,139(10.22)
1상3선식(220/440[V])	22	185	3,452	2,251	5,888(0.48)
3상3선식(200[V]-V)	31	970	3,394	4,064	8,428(0.69)
3상3선식(200[V]-Δ)	32	2	4	4	10(0.00)
3상4선식(110/220[V]-V)	41	10,838	20,530	4,034	35,402(2.89)
3상4선식(220/380[V]-Y)	43	81,918	346,896	355,806	784,620(64.06)
합 계	119,851	538,516	566,433	1,224,800(100)	

표 3. 국내 배전용 변압기 결선별 과부하 판정기준 비교
Table 3. The criteria of the overload in TR

결선 방식	판정(가)[%]
단상 2선식 220[V]	130
단상 3선식 220/110[V]	110
삼상 3선식 200[V](Δ)	130
삼상 4선식 220/110[V]	공용 : 110, 전용 : 130
삼상 4선식 220/380[V]	공용 : 130(용량이 다른 변대) 전용 : 100
삼상 4선식 220/380[V]	110(동일용량 변대)

표 3에 있는 과부하 판정 기준에 따라 단상 2선식 결선에서 변압기 용량에 따른 정격 최대전류와 과부하시 최대전류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

표 4. 변압기 정격/과부하 최대부하전류
Table 4. The rated/maximun load current of the TR

주상 변압기 용량[kVA]	정격 최대전류[A]	과부하 최대전류[A]
30	136	177
50	227	295
75	341	443
100	455	592
150	682	887

중성선을 공용할 경우 중성선에는 고압 중성선 전류(불평형+3배수) 84[A]와 정격/과부하 저압 부하전류를 더해 최대 중성선 전류를 다음과 같이 추정할 수 있다.

표 5. 공용시 최대 중성선 추정 전류
Table 5. Maximum neutral current in common

주상 변압기 용량[kVA]	정격 최대전류[A]	과부하 최대전류[A]
30	220	261
50	311	379
75	425	527
100	539	676
150	766	971

중성선 최대 추정치에 반해 고압 중성선은 다음 표로 나타낼 수 있으며 95[mm²]까지가 최대이다.

표 6. 고압 중성선의 연속허용전류
Table 6. Continuous permissible current in the HV neutral line

종 류		규 격 별				
가공전선	AW-OC	규격(mm ²)	32	58	95	160
		허용전류(A)	145	210	268	395

표 6에 볼 수 있는 것처럼 ACSR 95[mm²] 중성선에 대해서 30[kVA]일 때 정격 및 과부하 최대전류가 220/261[A]로 만족하며 그 외에는 연속허용전류를 초과한다.

3. 중성선 전류 시뮬레이션

도체의 연속허용전류를 초과하는 중성선 전류가 예상되었기 때문에 사실 확인을 위해 실측이 필요했다. 실측에 앞서 측정 위치나 대상 설정 및 이론 검증을 위해 전력계통 과도해석 프로그램인 PSCDA/ EMTDC를 이용하여 시뮬레이션을 수행했다.

단상 변압기가 그림 5 처럼 여러 방향으로 전력을

공급하거나 변압기에서 직접 전력을 공급한다면 중성선을 공용해도 큰 문제가 되지 않지만 문제가 되는 구성으로 시뮬레이션을 수행하고 실측하기 위해 그림 6처럼 3상 공급의 맨 마지막에 위치해 단방향으로 전력을 공급받는 단상 변압기 계통으로 모의하고 실측했다.

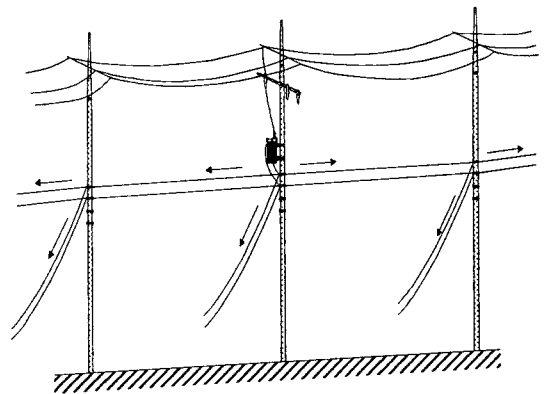


그림 5. 단방향으로 전력을 공급하지 않는 단상 변압기
Fig. 5. Single phase transformer with multi-directions

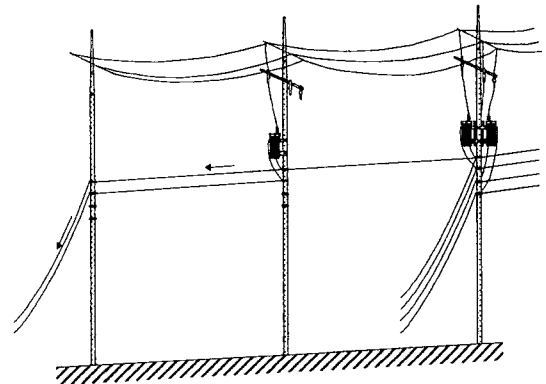


그림 6. 단방향으로 전력을 공급하는 단상 변압기
Fig. 6. Single phase transformer with single-directions

문제가 발생하는 상황을 모의하기 위해 단방향으로 전력을 공급하는 단상 변압기를 포함시켜 시뮬레이션을 수행했다.

그림 7과 8을 통해 알 수 있는 것처럼 100[kVA] 단상 변압기에 전체 부하를 걸어 부하 전류와 중성선 전류를 살펴본 결과 부하전류가 3배수 초과

중성선 공용시 3배수 고조파에 따른 문제점 분석

류와 함께 중성선에 그대로 흐르는 것을 확인할 수 있었다.

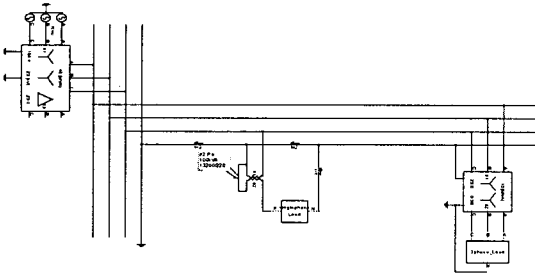


그림 7. 중성선 전류 모델링
Fig. 7. Modeling in the neutral current

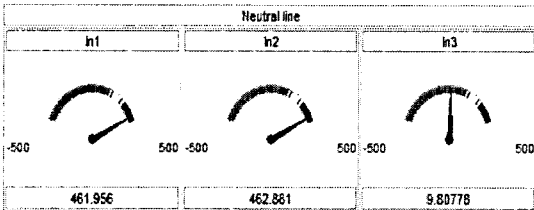


그림 8. 부하전류, 단상 중성선 전류, 3상 중성선 전류
Fig. 8. Load current, single phase current, neutral current

4. 단상변대의 중성선 전류 실측분석

중성선 공용시 중성선에 흐르는 불평형 전류, 고조파 전류, 저압 수용가 복귀 전류를 알아보기 위해 중성선 공용, 단방향 전력공급, 대형 부하(심야부하) 조건을 갖춘 단상 변대 1곳을 선정하여 측정하였다.

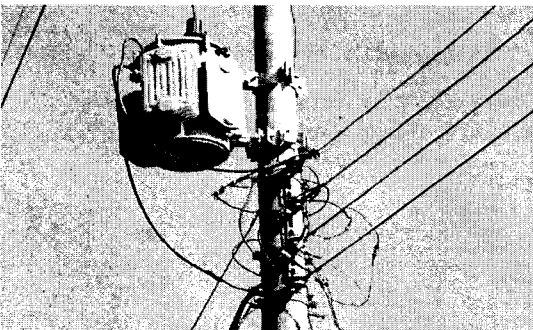


그림 9. 100(kVA) 용량의 단상 변압기와 중성선
Fig. 9. Single phase TR and neutral line at 100(kVA)

선택한 저압계통과 주요 부하는 3상의 맨 마지막에 위치한 단상 변압기로 단방향 전력공급하는 형태였으며, 45[kW] 심야전력 설비(220[V]/180[A]) 2대를 강제로 작동시켜 측정하였다. 측정기의 측정은 다음과 같이 이루어졌다.

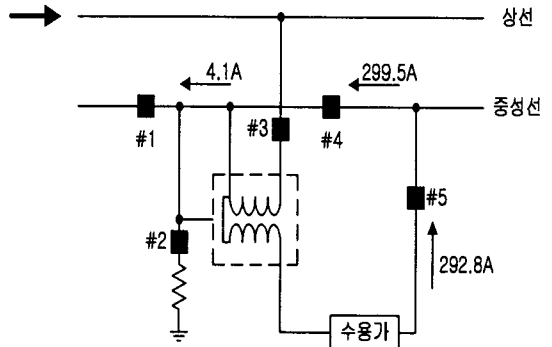


그림 10. 중성선과 상선 전류 측정 위치
Fig. 10. The location of measurement at the neutral current

그림 10에서 접지쪽으로 흐르는 #2의 전류는 0.1[A] 이하로 제외했고, 변압기 1차측 #3의 부하전류는 변압기 2차측 부하전류와 같음을 확인했다. 따라서 나머지 #1(3상쪽 중성선), #4(단상쪽 중성선), #5(단상쪽 부하전류)를 다음과 같이 측정해서 결과를 얻었다.

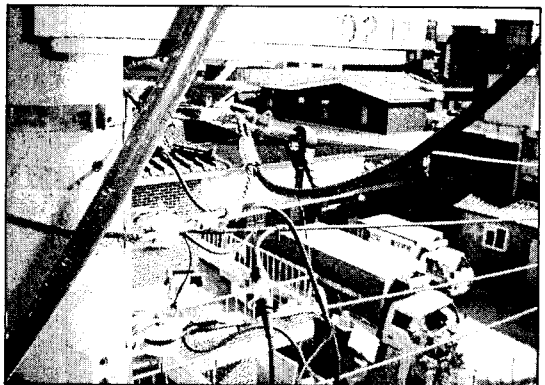


그림 11. 3상쪽 중성선 측정
Fig. 11. Measurement of the neutral line at three phase side

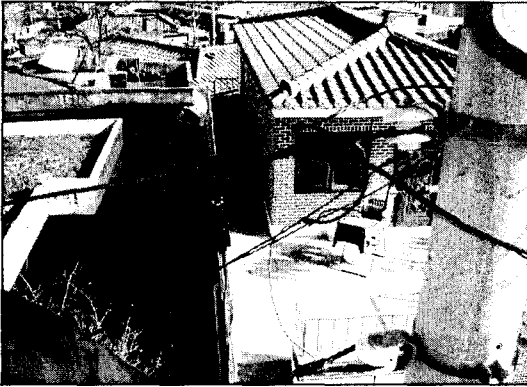


그림 12. 단상쪽 중성선을 측정
Fig. 12. Measurement of the neutral line at single phase side

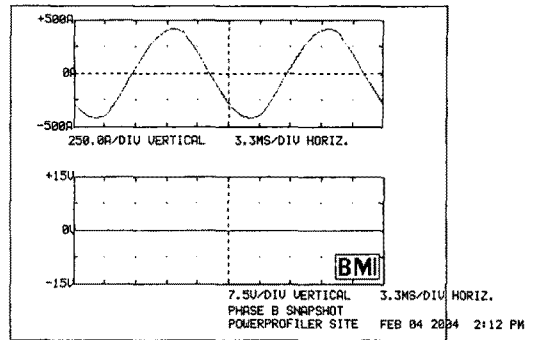
측정 결과 단상쪽 부하 전류와 중성선 전류는 299.5[A]와 292.8[A]로 변압기에서 공급하는 부하를 제외하면 부하 전류가 대부분 중성선에 흐르는 것을 볼 수 있다. 90[kW] 심야부하 설비는 고조파를 발생 시키지 않기 때문에 고조파 성분은 많지 않으며, 심야부하 설비만으로도 ACSR 95[mm]의 268[A]를 초과하기 때문에 결과적으로 중성선 전류가 문제가 될 가능성이 크다.

표 7. 중성선 전류와 부하 전류의 크기와 고조파
Table 7. The value of neutral/load current and harmonic

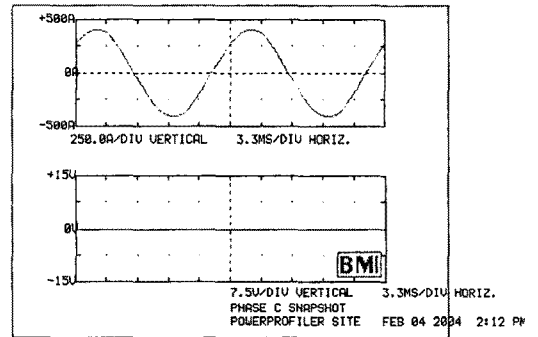
	단상쪽 부하 전류		단상쪽 중성선 전류		3상쪽 부하 전류	
	크기[A]	성분[%]	크기[A]	성분[%]	크기[A]	성분[%]
실효치	292.8		299.5		4.1	
I1	292.7	100	299.4	100	3.9	100
I3	0.0556	1.9	0.0569	1.9	0.00702	18
I5	0.0297	1.0	0.0304	1.0	0.00636	16.3
I7	0.0117	0.4	0.0120	0.4	0.00390	10
I9	0.0175	0.6	0.0179	0.6	0.00172	4.4
I11	0.0058	0.2	0.0060	0.2	0.00047	1.2
I13	0.0000	0.0	0.0000	0.0	0.00043	1.1

5. 3상 변대에서의 중성선 전류

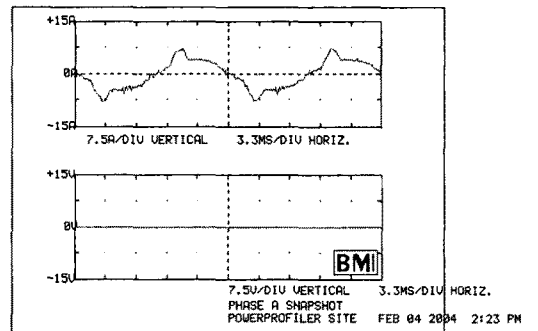
3상 변대에서는 3상이 동용량일 경우 3배수 고조



(a) 단상 상전류
(a) Single phase current



(b) 단상쪽 중성선 전류
(b) Single phase neutral current



(c) 3상쪽 중성선 전류
(c) Three phase neutral current

그림 13. 전류 측정 파형
Fig. 13. Waveforms of current

파 전류가 크며 이용량일 경우 동력용 변압기는 전동용 변압기보다 두 단계 아래이기 때문에 불평형 전류가 커서 단상과 유사한 문제를 일으킬 수 있다.

중성선 공용시 3배수 고조파에 따른 문제점 분석

중성선 전류의 주요한 원인이 되는 3배수 고조파 전류는 단상 비선형 부하가 사용하는 단상 정류회로에 기인하며, IEC 61000-3-2의 클래스 D에 속하는 TV, 컴퓨터, 모니터가 부하전류 대 3배수 고조파 전류를 가장 많이 발생시킨다. 기본적으로 단상 전파 정류 회로의 이론적 고조파 함유율은 다음과 같다.

표 8. 단상 전파전류 회로의 고조파 전류 함유율
Table 8. Harmonics of the single phase power convert

차수	3	5	7	9	11	13	15
[%]	67	40	29	22	18	15	13

중성선에 흐르는 최대 3배수 고조파를 추정하는데 있어 계산상의 편의로 기본파 전류가 100[A]라고 가정하면 실효치와 3배수 고조파는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{실효치} &= \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + \dots} \\ &= \sqrt{100^2 + 67^2 + 40^2 + 29^2 + 22^2 + \dots} \\ &= 134 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{3배수 고조파} &= \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2} \\ &= \sqrt{67^2 + 22^2 + 13^2} \\ &= 72 \end{aligned}$$

이 전류에 포함되는 3배수 고조파 전류는 기본파 전류의 72[%] 정도가 되고, 고조파 전류까지 포함한 실효치로 정규화 하기 위해 134로 72를 나누면 3배수 고조파는 53.7[%] 정도가 된다. 따라서, 중성선에 흐르는 전류는 다음과 같이 상전류에 1.61배가 됨을 알 수 있다.

$$\text{중성선 전류} = 3 \times \frac{\text{3배수 고조파}}{\text{실효치}} \approx 3 \times \frac{0.537}{1.0} \approx 1.61[\text{배}]$$

3상4선식(220/380[V]) 결선에서 동용량은 과부하율이 110[%]이고 이용량은 과부하율이 130[%]이다. 과부하율과 3배수 고조파를 고려하면 중성선 전류는 다음과 같이 정리할 수 있다.

표 9. 용량에 따른 3상4선식 결선의 중성선 전류
Table 9. Neutral current by the size of TR in the 3 phase/4wires

	용량	부하 전류	과부하 전류	고조파 전류	불평형 전류	중성선 전류
동용량	100[kVA]	455[A]	500[A]	800[A]	0[A]	800[A]
	100[kVA]	455[A]	500[A]			
	100[kVA]	455[A]	500[A]			
이용량	100[kVA]	455[A]	591[A]	195[A]	364[A]	559[A]
	50[kVA]	227[A]	227[A]			
	50[kVA]	227[A]	227[A]			

동용량의 경우 100[%] 과부하 전류 500[A]의 1.6배가 되어 중성선 전류는 800[A]가 되며, 이용량의 경우 100[kVA] 중 50[kVA]는 3상 부하에 해당하기 때문에 과부하율 130[%]일 때의 591[A]에서 227[A]를 뺀 364[A]가 단상 부하가 된다. 364[A]의 53.7[%]가 195[A]로서 중성선에 흐르는 3배수 고조파이고 불평형 전류가 364[A]이기 때문에 중성선 전류는 559[A]가 된다.

동용량일 때의 800[A]는 3상의 모든 부하가 단상 비선형 부하일 때의 최고치이기 때문에 산술적인 의미가 강하고, 이용량일 때의 559[A]는 불평형 전류와 일부 단상 부하로 인한 3배수 고조파만을 고려한 것이기 때문에 현실적인 최대값으로 적당하다.

또한 중성선을 분리시 중성선 사고에 따른 이상전압에 대비가 가능할뿐 아니라 저압측 임피던스가 낮아서 전압 강하가 작아지게 되며 손실도 감소된다.

6. 결 론

단상 2선식의 경우 중성선 공용에 의해 불평형 전류, 3배수 고조파, 저압 부하의 복귀전류가 모두 중성선에 흐르기 때문에 도체의 연속허용전류를 초과할 가능성이 제기되어 실계통 측정과 시뮬레이션을 통해 확인했다. 3상4선식 결선에서도 단상2선식과 마찬가지로 현재의 중성선 도체의 연속허용전류 이상의 전류가 흐른다.

배전설계기준이나 현행의 배전계통 또는 저압계통 운영에 있어 고조파가 거의 고려되지 않았기에 앞서 살펴본 것처럼 도체 규격을 초과하는 전류가

호르고 있다. 이러한 문제는 기기 오동작, 열화 및 수명 감소 등의 영향을 주지만 고조파에 대한 인식 부족으로 설비 및 운영기준에 제대로 반영되지 못해왔다. 향후 유사한 문제의 발생 가능성은 더욱 높아질 것이기 때문에 고조파에 대한 인식 및 대책 마련에 힘써야 한다.

References

- (1) 대한전기협회, “2006 전기관계 법령집”, pp392.
- (2) 대한전기협회, “2006 내선규정”, pp204.
- (3) 한국전력공사 “설계기준 DS 3300(전선과 가선)”, pp 27-28, 2006. 9.

◇ 저자소개 ◇

조남훈 (趙南勳)

1965년 8월 16일생. 1993년 중앙대학교 전기공학과 졸업. 2002년 충남대학교 전기공학과 졸업(석사). 1992년 한국전력공사 입사. 현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원.
 Tel : (042)865-7693
 Fax : (042)865-5904
 E-mail : namhun@kepri.re.kr

정점수 (鄭点秀)

1971년 11월 20일생. 2002년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 1997년 한국전력공사 입사. 현재 한국전력공사 전력연구원 일반연구원.
 Tel : (042)865-5936
 Fax : (042)865-5904
 E-mail : jkun4184@kepco.co.kr

박용우 (朴龍雨)

1956년 11월 5일생. 1982년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1995년 연세대학교 산업대학원 전기전공 졸업(석사). 1982년 한국전력공사 입사. 현재 한국전력공사 전력연구원 배전연구소장.
 Tel : (042)865-5900
 Fax : (042)865-5904
 E-mail : ywpark@kepco.co.kr

하복남 (河福男)

1958년 1월 10일생. 1986년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 1994년 충남대학교 전기공학과 졸업(석사). 2004 충남대학교 전기공학과 졸업(박사). 1978년 한국전력공사 입사. 현재 한국전력공사 전력연구원 수석연구원.
 Tel : (042)865-5930
 Fax : (042)865-5904
 E-mail : bnha@kepri.re.kr

이흥호 (李興浩)

1950년 10월 28일생. 1973년 서울대학교 공업교육과 전기전공 졸업. 1977년 서울대학교 공업교육과 전기전공 졸업(석사). 1994년 서울대학교 컴퓨터공학과 졸업(박사). 현재 충남대학교 전기정보통신공학부 전기공학전공 교수.
 관심분야 : 전기설비자동화 디지털 응용
 Tel : (042)821-5656
 Fax : (042)821-8895
 E-mail : eehh@cnu.ac.kr