

배전 계통에서의 고조파 계획레벨 결정을 위한 연구

전영재*, 조남훈
전력연구원, 전력연구원

A Study on the determination for Planning Levels of Harmonics in Distribution Systems

Young-Jae Jeon*, Num-Hun Cho
KEPRI, KEPRI

Abstract - This paper presents the determination procedure for planning levels of harmonics in distribution systems. Planning levels should be determined by considering the system property, operation condition, and others based on compatibility levels. In this paper international standards for harmonics are studied and the determination procedure for planning levels is deduced.

1. 서 론

최근 비선형 부하의 급증에 따라 고조파로 인한 문제가 많이 발생하고 있어 배전계통 고조파 관리기준의 필요성이 증대되고 있다. 이에 대한 연구가 계속 지속되어 왔고 간단한 관리기준이 적용되고 있지만 현재 통용되고 있는 국제 기준의 핵심과 국내 배전계통의 특성이 제대로 반영되지 않아 국내 적용에 많은 어려움이 따르고 있는 실정이다.

고조파 관리기준은 철도 시스템의 급전선이 고조파로 인해 소손된 것을 계기로 1953년 영국에서 G5/1이 처음 제시되었다. 이 기준은 현재 G5/4까지 개정되었고, 이전 기준인 G5/3에 영향을 많이 받은 IEC와 IEEE 기준이 개정을 거듭하며 많은 국가와 전력회사에서 사용되고 있다[1,2,3].

일반적으로 관리기준에서 최종적으로 제시하는 것은 배전계통에서 유지해야 하는 고조파 전압 총합 왜형을 (Total Harmonic Distortion : THD)과 수용가의 고조파 전류 제한치이다. 일반적으로 계획 레벨로 간주되는 전압 THD는 고조파의 외란과 내성에 관계되는 양립성 레벨에 근거해 결정되고, 전류 제한치는 결정된 전압 THD를 수용가의 용량이나 특성에 따라 할당해 결정된다. 따라서, 고조파 관리 기준 결정을 위해서는 양립성, 내성, 계획 레벨 사이의 관계를 이해하고 국제 기준의 결정 과정을 살펴볼 필요가 있다. 이 논문에서는 고조파와 관련하여 IEC, IEEE, EN 등의 중요한 국제 기준을 검토하였고, 계획 레벨을 결정하는 과정을 추론하여 고조파 관리기준에 필요한 검토사항과 결정 방법을 제시하였다.

2. 양립성과 계획 레벨

2.1 양립성 레벨

양립성 레벨은 어떤 계통에서 발생하는 외란과 연결된 기기들의 내성에 관련되어 있다. 즉, 외란은 연결된 기기들에 영향을 주지 않는 레벨로 유지되어야 하고, 기기들은 일반적인 외란에 충분한 내성을 가져야 한다. 계통의 외란과 기기의 내성이 독립적일 수 없기 때문에 양립성 레벨이라는 개념을 가지고 여러 국제 기준에서 고조파를 비롯한 많은 전자기 외란 문제를 다루고 있다[4].

양립성 레벨이 계통의 외란과 기기의 내성에 관련되어 있기 때문에 실제 적용시 외란 레벨과 내성 레벨 중간에

위치하게 되어 고조파와 관련한 모든 레벨의 기준이 된다.

2.2 계획 레벨

계획 레벨은 어떤 지역에서 전력계통을 운영하고 책임을 지는 전력회사가 채택하는 값이고, 그 지역의 시스템에 연결하는 기기나 수용가의 고조파 방출량을 제한하기 위한 수단으로 사용된다. 계통의 특성, 기본적인 고조파 수준, 공간의 확률, 부하 특성 등이 고려되어야 하기 때문에 양립성 레벨에 관한 여유분 확보를 이유로 양립성 레벨보다 낮은 수준으로 결정된다. 이 여유분으로 결정되는 계획 레벨의 수준에 따라 전력회사와 수용가가 부담해야 하는 경제적인 정도가 달라지기 때문에 적절한 결정이 이루어져야 한다.

2.3 양립성, 내성, 계획 레벨의 관계

앞서 언급한 것을 정리하기 위해 양립성, 내성, 계획 레벨의 관계를 다음 그림으로 나타내었다.

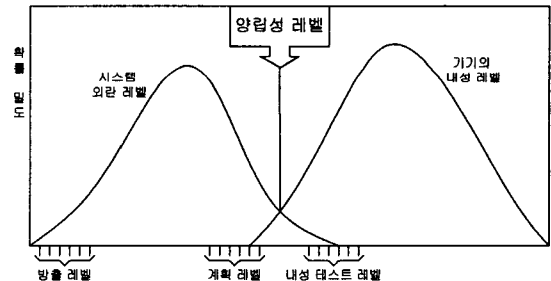


그림 1. 양립성, 내성, 계획 레벨의 관계

그림 1에서 왼쪽의 확률 분포는 시스템 외란의 정도를 표현한 것이고 오른쪽의 확률 분포는 외란에 영향을 받는 기기의 내성 정도를 나타낸다. 양립성 레벨은 앞에서 언급한 것처럼 외란과 내성 레벨 중간에 위치하여 기기에 영향을 주지 않도록 시스템 외란을 관리하고 외란에 영향을 받지 않도록 기기를 제조하도록 하는 기준이 된다. 그림 1은 단지 이들 레벨 사이의 관계를 나타낸 것일 뿐 실제의 분포는 아니기 때문에 시스템 외란 분포와 내성 분포가 그림에서처럼 반드시 접친다고 생각할 필요는 없다[4,5].

3. 계획 레벨의 결정

3.1 국제 기준의 양립성 레벨

양립성 레벨은 그림 1에서 보이는 것처럼 외란과 내성 분포를 기반으로 결정되어야 하지만 현실적으로 두 분포를 알 수가 없다. 이에 따라 현실적으로 그림 1에 있는 내성 테스트 레벨을 결정하고, 이 레벨 바로 아래를 양

립성 레벨로 IEC 61000-2-1과 G5/4에서 사용하고 있다. 일반적으로 많이 사용되면서 고조파에 민감한 전력용 캐패시터를 내성 테스트 레벨의 대상으로 이용하고 있으며, 전압 THD 8[%]가 포함된 110[%] 전압에 내성을 갖도록 되어 있다. 다른 방법으로는 어느 레벨까지 문제가 없다가 어느 레벨부터 갑자기 문제가 발생하기 시작하는 레벨을 양립성 레벨로 결정하는 방법이다. 일본의 조사 결과 그림 2에서처럼 THD 8[%]부터 사고가 급증하는 것을 볼 수 있다.

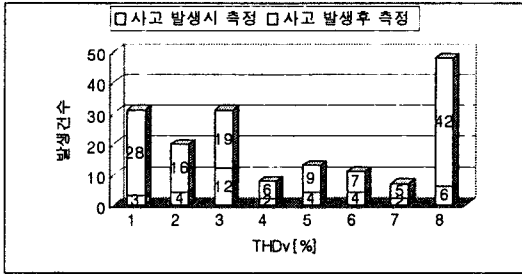


그림 2. 고조파로 인한 사고기록

이 외에 유도 전동기가 THD 8[%] 이상에서부터 과열로 문제가 된다는 실험 결과가 있다. 이러한 결과와 경험들은 단편적으로 문헌에서 찾아볼 수 있을 뿐 국제 기준에는 언급되지 않은 실정이다. 또한, THD에 관한 기준 외에 차수별로 양립성 레벨이 제시되어 있지만 이에 관한 내용은 어떠한 문헌에도 찾아볼 수 없어서 각 레벨에 관한 추정도 어려운 실정이다. 다행스러운 것은 많은 국제 기준에서 사용하는 양립성 레벨이 아래의 표와 같이 거의 동일하다는 점이다[5].

표 1. 61000-2-12의 양립성 레벨

흡수 고조파(비 3배수)		흡수 고조파(3배수)		작수 고조파	
차수	고조파 전압(%)	차수	고조파 전압(%)	차수	고조파 전압(%)
5	6.0	3	5.0	2	2.0
7	5.0	9	1.5	4	1.0
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3.0	21	0.3	8	0.5
17	2.0	21<h≤45	0.2	10	0.5
17<h≤49	2.27(17/h) -0.27			10<h≤50	0.25(10/h) +0.25

THD : 8%

배전계통에 사용되는 양립성 레벨이 IEC 61000-2-2, 2-12, 3-6, EN 50160, G5/4에 나와 있지만 고차 고조파에 대한 수식만 약간 다를 뿐 모두 같은 양립성 레벨을 가지고 있다. 양립성 레벨의 결정 절차와 내용을 알 수 없지만 IEC 기준의 95[%] 이상이 KS 규격으로 공표되어 있는 국내 현실을 감안할 때 IEC의 양립성 기준을 그대로 따르더라도 큰 문제가 되지 않을 것으로 생각된다[3,4,5,6,7].

3.2 G5/4와 IEEE 519의 계획 레벨

영국의 G5/4에서는 배전계통의 계획 레벨을 THD 4[%]로 제시하였다. 영국을 비롯한 유럽 배전계통은 30[MVA] 용량의 MTR에 12개의 피더를 갖고 있고, 하나의 피더에 500[kVA] 배전용 변압기 5개가 연결된 것이 일반적이다. 상쇄되는 것을 감안하여 4개의 수용가 또는 변압기가 있고 각 수용가가 2[%]씩 고조파를 발생시킨다고 가정할 때 다음과 같이 계산된다[3].

$$4[\%] = \sqrt{2^2 + 2^2 + 2^2 + 2^2}$$

경험상 각 수용가가 2[%]만큼 발생시키는 경우가 드물어 THD 4[%]를 유지하는데 큰 문제가 없다고 한다. 다만 차수별 계획 레벨에 대한 설명이 G5/4나 해설서인 ETR 122에 나와있지 않아 적용을 위해서는 추가적인 조사가 필요하다.

IEEE 519는 양립성 레벨과 계획 레벨을 고려하지 않으며, THD 5[%], 차수별 3[%]라는 단순한 기준을 갖고 있다. 결정된 이유에 대해 기준이나 다른 문헌에서 찾아보기 힘들며, 제정 당시 많은 실험과 경험을 바탕으로 결정되었다고 알려져 있다[8]. 즉, THD 5[%] 이하일 때 어떤 시스템이나 기기가 고조파로 인한 영향을 거의 받지 않는다는 경험에 근거한다고 한다. 차수별 3[%]는 THD 5[%]일 때 6펄스 정류기의 5차 고조파 발생량이 2.3[%]가 되어 최대인 5차 고조파를 기준으로 3[%]로 결정된 것으로 추정된다. 이것은 산업용 수용가에 대한 양립성 레벨이 THD 5[%], 차수별 3[%]로 제시된 IEC 61000-2-4과 맥락을 같이 한다[9].

3.3 IEC 61000-3-6의 계획 레벨

수많은 관련 기준들이 있고 기준 자체에 많은 설명이 있어 가장 참고할만한 기준이 IEC 61000-3-6이다. 여기에 제시된 계획 레벨이 다음과 같다.

표 2. IEC 61000-3-6의 계획 레벨

흡수 고조파(비 3배수)			흡수 고조파(3배수)			작수 고조파		
차수	고조파 전압(%)		차수	고조파 전압(%)		차수	고조파 전압(%)	
	MV	HV-EHV		MV	HV-EHV		MV	HV-EHV
5	5.0	2.0	3	4.0	2.0	2	1.6	1.5
7	4.0	2.0	9	1.2	1.0	4	1.0	1
11	3.0	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.5
13	2.5	1.5	21	0.2	0.2	8	0.4	0.4
17	1.6	1.0	>21	0.2	0.2	10	0.4	0.4
19	1.2	1.0				12	0.2	0.2
23	1.2	0.7				>12	0.2	0.2
25	1.2	0.7						
>25	0.2+1.3 (25/h)	0.2+1.3 (25/h)						

MV에서 THD : 6.5%, HV에서 THD : 3%

IEC 61000-3-6에 나온 계획 레벨은 기준 자체는 물론이고 어떠한 문헌에서도 배경 지식을 찾아볼 수 없다. 이와 관련하여 IEC 기준에 영향을 많이 준 CIGRE에서 주도적인 활동을 하고 있는 프랑스 전력회사 EDF의 계획 레벨이 아래와 같은데 IEC 기준과 유사하다는 사실을 발견하였다.

표 3. 프랑스 EDF의 양립성 레벨과 계획 레벨

흡수 고조파(비 3배수)			흡수 고조파(3배수)			작수 고조파		
차수	양립성 레벨	계획 레벨	차수	양립성 레벨	계획 레벨	차수	양립성 레벨	계획 레벨
5	6.0	4.6	3	5.0	3.8	2	2.0	1.0
7	5.0	3.8	9	1.5	1.1	4	1.0	0.7
11	3.5	2.7				6	0.5	0.3
13	3.0	2.3				8	0.5	0.3
17	2.0	1.5				10	0.5	0.3
19	1.5	1.5						
23	1.5	1.5						
25	1.5	1.5						

MV에서 THD : 6.2%

표 3에 제시된 계획 레벨은 계산이나 데이터 분석을 통해서 얻은 것처럼 되어 있어 IEC 기준의 양립성 레벨과 계획 레벨의 관계 속에서 계획 레벨을 추정해 보았다. IEC 61000-3-6에서 측정값 중에서 95[%]에 해당하는 값을 기준으로 고조파 제한치 위반 여부를 결정하기 때문에 계획 레벨이 양립성 레벨의 95[%] 값에 해당될

수 있을 것이라고 가정하였다. 이 95[%] 값은 전체 시스템 외란의 95[%]에 해당하기 때문에 정규 분포에서 95[%] 값을 찾을 수 있는 다음의 식을 이용하였다.

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

여기서, μ 와 σ 는 평균과 표준편차이고, X 와 Z 는 확률변수와 표준정규분포 확률변수이다.

위에서 언급한 EDF의 계획 레벨을 추정하기 위해서는 추가적인 가정이 필요하다. 평균과 표준편차를 알아야 정규분포의 95[%]에 해당하는 값을 얻을 수 있는데 측정 사례와 데이터가 부족하여 시스템 외란 레벨을 평균과 표준편차를 알 수 없다. 그래서 평균은 양립성 레벨의 절반값을 사용하고, 표준편차는 통계학에서 정보가 부족할 때 사용하는 '(최대값-최소값)/5' 방법을 사용하였다. 먼저 5차 고조파에 대해 이같은 방식을 이용하여 계획 레벨에 해당하는 값을 최대값으로 표준편차 '(5-0)/5=1.0'을 구했다. 이 표준편차와 식 (1)을 풀어서 적용한 결과가 다음과 같다.

$$X(5차) = 1.0 \times 1.645 + (6/2) = 4.645$$

위에서 사용된 $Z=1.645$ 는 표준정규분포에서 90[%] 이내에 들어가는 값을 구할 때 사용하는 값이다. 표준정규분포의 왼쪽과 오른쪽에 5[%]씩 할당되기 때문에 오른쪽 5[%] 경계값이 95[%] 값이 되는 것이다. 4.645는 소수점 둘째 자리에서 반올림하면 표 3에 5차 고조파의 계획 레벨에 해당하는 4.6과 일치한다. 동일한 방법으로 다른 차수를 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X(3차) &= 0.79 \times 1.645 + (5/2) = 3.8 \\ X(7차) &= 0.79 \times 1.645 + (5/2) = 3.8 \\ X(9차) &= 0.58 \times 1.645 + (3.5/2) = 2.7 \\ X(11차) &= 0.49 \times 1.645 + (3/2) = 2.3 \end{aligned}$$

이렇게 계산한 결과를 비교하기 위해 IEC, EDF의 양립성, 계획 레벨을 아래와 같이 정리하였다.

표 4. 계획 레벨의 결정 결과

	IEC/EDF의 양립성 레벨	IEC의 계획 레벨	EDF의 계획 레벨	표준편차	
				양립성 레벨 비율	계산값
THD	8%	6.5%	6.2%	1.33%	1.33%
5차	6%	5%	4.6%	1.0%	1.0%
7차	5%	4%	3.8%	0.83%	0.79%
11차	3.5%	3%	2.7%	0.58%	0.58%
13차	3%	2.5%	2.3%	0.5%	0.49%

표 4에서 알 수 있듯이 계산을 통해 EDF의 계획 레벨 값을 사용할 수 있었으며, 이때 사용한 표준편차가 IEC/EDF 양립성 레벨의 상대적 비율과 거의 일치함을 알 수 있다. 또한, IEC 계획 레벨은 EDF의 계획 레벨과 같은 방법이 사용되어 .5나 .0 처리를 한 것으로 추정할 수 있다.

3.4 계획 레벨을 결정하기 위한 고려 사항

G5/4나 IEC/EDF 계획 레벨의 결정 방법을 위에서 살펴 보았지만 시스템 특성과 운전 조건이 다르기 때문에 검토없이 받아들이는 것은 매우 위험하다. 고려할 사항은 여러 가지 있지만 시스템 단락용량과 저압 계통의 특성이 고조파 제한치와 관련된 계획 레벨 결정에 있어 아주 중요하다.

우선 국내 배전계통의 대략적인 단락용량을 살펴보기

위해 A, B, C 지역으로 구분되는 전력관리처 하나씩을 선택하여 모선 단락 용량의 평균을 구했다. 단락용량은 선로 임피던스가 증가됨에 따라 떨어지기 때문에 일반적으로 사용되는 ACSR 160mm²의 선로 임피던스를 사용하여 거리에 따른 단락 용량을 계산하였다. 결과가 다음 표에 정리되었다.

표 5. 국내 배전계통의 단락 용량

	모선 단락용량		간선의 평균중앙	산정 지점	최종 단락용량	
	%Z	단락용량			%Z	단락용량
A지역	33.9[%]	295[MVA]	4.5[km]	2.25[km]	52.4[%]	191[MVA]
B지역	34.2[%]	292[MVA]	7.5[km]	3.75[km]	65.1[%]	154[MVA]
C지역	42.6[%]	235[MVA]	16[km]	8.00[km]	108[%]	93[MVA]

평균적인 단락용량은 모선과 말단이 아닌 선로 중간의 단락 용량을 의미하므로 산정지점을 간선의 절반에 해당하는 지점에서 최종적인 단락용량을 구하였다. 결과적으로 여러 가지 요인이 있겠지만 단락용량만을 고려할 때 A지역은 G5/4에서 180[MVA]로 된 것보다 높아 공진 가능성이 적고, B와 C 지역은 상대적으로 높을 것이다. 단락용량 외에 저압 계통의 특성을 고려해야 하는 이유는 다음 표와 같이 유럽과 우리가 상당히 틀리기 때문이다.

표 6. 미국, 유럽, 한국의 저압 계통

	연결	미국	유럽	한국
		Y-Y	Δ-Y	Y-Y
저압 변압기	상	거의 단상, 3상	3상	거의 단상, 3상
	용량	50[kVA]	500 or 1000[kVA]	50, 75[kVA]
	수용가수	6~10	60~100	20~30
	중가임피던스	높음	낮음	3.2 ~ 3.8[%]
피더	전압	12.5[kV]	11 or 12[kV]	22.9[kV]
	선	4	3	4
수용가	전압	120/240[V]	230[V]	220[V]
	선	3	2	2
	중가임피던스	낮음	높음	측정중

표 6에서처럼 한국과 미국은 유사한 저압 계통을 가지고 있고 유럽은 우리와 상이하다. 저압 변압기 결선인 Δ-Y이기 때문에 3차 고조파가 배전계통으로 넘어가지 않고 많은 수용가 수로 인해 상쇄되는 양이 국내보다 많아지게 된다. 따라서, 저압 계통의 상이함을 고려하면서 IEC 기준이 국내에 적용되어야 한다.

4. 결 론

배전계통의 고조파 관리기준 결정에 필요한 기본적인 개념과 고려사항을 살펴 보았다. 많이 사용되는 국제 기준의 양립성, 계획 레벨의 근거와 결정 방법을 분석하였고, 중점적으로 고려해야 하는 사항을 검토함으로써 배전계통의 실측 결과와 부하, 시스템 특성에 관한 데이터가 추가되면 본 논문에서 검토한 것을 바탕으로 합리적인 배전계통 고조파 관리 기준을 제정할 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] EA, G5/1, 1953
- [2] EA, G5/3, 1979
- [3] EA, G5/4, 2000
- [4] IEC, IEC 61000-2-2, 2002
- [5] IEC, IEC 61000-2 12,
- [6] IEC, IEC 61000-3-6, 1995
- [7] EN, EN 50160, 2000
- [8] IEEE, IEEE Std. 519, 1995
- [9] IEC, IEC 61000-2 4, 2002