

원전 전력계통 고조파왜형을 규제 경험

문수철*, 김복렬*, 김건중**
한국원자력안전기술원*, 충남대**

Regulation Experience on Harmonics Distortion in Nuclear Power System

Su-Cheol Moon*, Bok-Ryul Kim*, Kern-Joong Kim**
Korea Institute of Nuclear Safety*, ChungNam University**

Abstract - 전력산업이 발전함에 따라 전력품질 요구도 증가하고 있으나 고조파왜형률에 대한 국제기준이 제조사와 운영자의 입장에 따라 계산방법이 상충되는 부분이 현실적으로 존재하고 있는 것으로 검토되었다. 본 논문에서는 원자력발전소에 사용되는 축전기 및 축전기의 시험 및 관리규격인 ANSI/IEEE 519와 NEMA PE-5에 대한 THD 계산방식에 대한 차이점을 설명하고 현장 규제경험 사례를 통해 바람직한 관리 방향을 제시하고자 한다.

1. 서 론

고조파왜형률은 Individual 및 Total Harmonics Distortion으로 구분하고 있으며 이에 대한 제한값으로는 각각 3[%], 5[%]로 관리되고 있다. 국내에서는 전압별 차등화한 고조파 관리기준을 ANSI/IEEE 내용의 일부를 인용하여 66kV 이하에서는 3[%], 154kV 이상 전압에서는 1.5[%]로 관리하고 있다. 저자가 원자력발전소의 축전기와 축전지에 대한 설계 단계에서 운영단계까지의 시험 및 관리기준을 조사한 결과, Utility는 적용기준에 대한 차이점을 이해하지 못하는 것으로 검토되었다.

ANSI/IEEE나 NEMA(National Electrical Manufacturers Association) 기준을 수정이나 검토 단계없이 번역자에 의해 그대로 직역되어 국내 산업기준으로 채택됨에 따라 사업자 및 설계자가 적용에 대한 적합성과 타당성 검토없이 그대로 인용함에 따라 시험자도 기준에 대한 계산방법의 차이점을 검토하지 않고 관리기준으로 적용하고 있음을 확인하였다. 이에 일관되고 통일된 계산방법에 대한 기준과 제한값을 사업자, 설계자 및 시험자에게 제시함으로써 계산방법에 대한 적합성과 타당성을 유지하여 전력품질 향상에 제고에 일조할 수 있었다.

따라서, 본 논문에서는 Utility에게 타당성을 입증한 내용으로 실제 현장 측정값을 이용하여 IEEE 519-1992와 NEMA PE-5-1997(Utility Type Battery Chargers)의 THD식에 적용하여 계산함으로써 현장에서는 적용이 불가능한 산업기준(KEPIC EEH1000)임을 입증하여 시험절차와 관리기준을 Utility가 개선하도록 유도하여 전력품질의 안전성 확보에 기여하고자 한다.

2. 고조파와 전압 기준

2.1 ANSI/IEEE 519-1992

ANSI/IEEE 519에서는 Voltage Distortion Factor을 기본파분에 대한 고조파의 비로 나타내고 있으며 VDF 계산식은 다음과 같다.

$$VDF = \sqrt{\frac{\sum \text{of squares of amplitude of all harmonics}}{\text{square of amplitude of fundamental}}} \times 100[\%]$$

또한, THD(Total Harmonics Distortion)은 서론에서 언급한 바와 같이 전압과 전류의 고조파왜형률로 제한값은 5[%]이며, IHD(Individual Harmonics Distortion)인 경우 3[%]이고 관련 국내기준은 표1과 같으며 계산식은 다음과 같다.

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100[\%]$$

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100[\%]$$

그리고, 고조파에 대한 HF(Harmonic Factor)는 전압과 전류평균값으로 3고조파의 합수로 HF를 계산하도록 다음과 같이 IEEE 519에서 제안하고 있다.

$$E_{HF} = \frac{\sqrt{E_3^2 + E_5^2 + E_7^2 + \dots + E_{3n-1}^2}}{E_1} \times 100[\%]$$

$$I_{HF} = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots + I_{3n-1}^2}}{I_1} \times 100[\%]$$

Voltage Regulation에서도 IEEE 1159-1995Ed에서 제안하고 있는데 정상적인 부하에서의 평균전압값으로 입력전압, 부하 및 온도 등의 변화에 따라 크기가 다르나 최대전압과 평균전압과의 차를 평균전압으로 나타내며 전압강하율과 다른 의미를 갖는다.

$$VR = \frac{V_{\max} - V_{avg}}{V_{avg}} \times 100[\%]$$

2.2 NEMA PE-5-1997

NEMA PE-5(Utility Type Battery Chargers)에서는 전압 및 전류의 THD를 분석하도록 제안하고 있으며 DF(Distortion Factor)는 기본파성분에 기본파를 포함한 고조파성분 합을 제곱근으로 제안하고 일부 Utility는 축전기 및 축전기의 설계단계에서 THD 분석기준으로 상기 규격을 활용하고 있는 것으로 조사되었다.

$$DF = \sqrt{\frac{\sum (\text{amplitude of all harmonics})^2}{\text{amplitude of fundamental}}} \times 100[\%]$$

전압과 전류에 대한 THD는 다음과 같이 제시하고 있다.

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100[\%]$$

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100[\%]$$

또한, NEMA에서는 주석으로 부하가 선형부하임을 가정한 것으로 기술되어 있고 비선형부하인 경우에는 IEEE 519에 따라 인용할 수 있음을 언급하고 있지만 일부 Utility는 설계단계부터 NEMA 기준을 번역해 놓은 KEPIC 기준을 활용하고 있어서 서론에서 언급한바와 같이 사업자와 시험자간 타당성을 인지하지 못하고 있어서 일관된 관리가 필요한 실정이다.

전압변동률 계산식도 IEEE 519에서 제시하는 계산방법과는 상이하고 이는 제조사의 입장에서 작성되었음을 아래식으로부터 평가할 수 있으며 제한치는 5[%]로 상당한 여유를 제공하고 있는 것으로 검토된다.

$$\text{Percent Regulation (Deviation)} = \pm \left(\frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \right) \times 100[\%]$$

2.3 전력계통 규정값

IEEE 519에 제시한 전압레벨별로 국내의 전압레벨에 부합하도록 보완하여 계통운영자에 의해 표1과 같이 관리되고 있으며 이를 만족하지 못하는 대규모수용가에 대해서는 별도의 보상장치를 설치하여 전력품질의 저해되지 않도록 계통을 운영하고 있으며, 표2는 지중선로와 가공선로에서의 각 전압별 THD와 EDC(등가방해전류)에 대한 제한값을 나타내고 있다.

<표 1> IEEE 519-1992 Table 11.1 Voltage Distortion Limits

Voltage	IHD [%]	THD [%]
69 kV below	3	5.0
69 kV ~ 161 kV	1.5	2.5
161 kV above	1.0	1.5

〈표 2〉 국내 고조파와 전압 제한값

Voltage	UnderGround lines		OverHead lines	
	THD [%]	EDC [A]	THD [%]	EDC [A]
66 kV below	3	-	3.0	-
154 kV above	1.5	3.8	1.5	-

EDC(Equivalent Disturbing Current)

$$EDC = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (S_n^2 \times I_n^2)} [A]$$

S_n : 통신유도계수, I_n : 영상고조파전류

2.4 실측값으로부터 비교

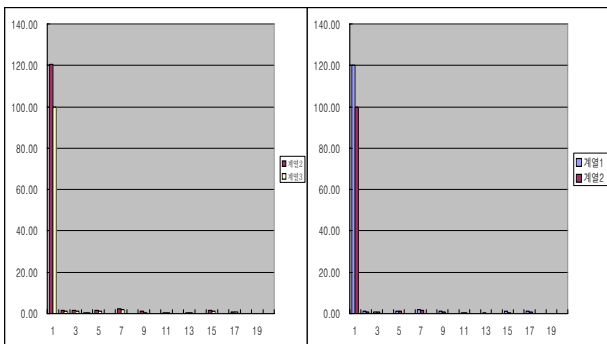
현장에서 측정한 고조파분석결과는 총 11번이며 이 중 최소와 최대 전압왜형률 분석값만을 사용하여 표3과 같이 정리하였다. 이로부터, ANSI/IEEE 519-1992와 NEMA PE-5에서 제시하는 계산식을 사용하여 표4와 같이 기본파성분 포함여부에 따라 결과를 간략하게 나타내었다. 여기서, 고조파차수가 증가함에 따라 Distortion Value는 비례하여 증가하므로 고조파 차수는 20차수까지만 계산하였다.

〈표 3〉 전압 고조파 측정값

No	V1	%	Deg	No	V2	%	Deg
1	120.63	100.00	0.00	1	120.24	100.00	0.00
2	1.46	1.21	-71.50	2	1.05	0.86	-86.32
3	1.50	1.24	-2.30	3	0.84	0.70	-5.13
4	0.36	0.31	-172.34	4	0.10	0.06	155.51
5	1.47	1.22	124.56	5	1.23	1.06	53.54
6	0.06	0.05	131.06	6	0.02	0.02	-171.33
7	2.13	1.77	123.85	7	1.74	1.45	84.46
8	0.07	0.06	26.65	8	0.04	0.04	102.53
9	1.17	0.37	153.05	9	1.07	0.83	100.63
10	0.01	0.01	147.82	10	0.04	0.04	30.26
11	0.26	0.23	176.30	11	0.32	0.27	136.54
12	0.01	0.01	-143.14	12	0.04	0.03	56.52
13	0.23	0.24	75.00	13	0.21	0.17	-26.53
14	0.03	0.02	32.16	14	0.03	0.02	50.25
15	1.41	1.17	71.72	15	1.15	0.36	-24.11
16	0.04	0.04	33.56	16	0.06	0.05	31.73
17	0.76	0.65	-67.82	17	1.02	0.85	166.83
18	0.02	0.01	-80.47	18	0.05	0.04	36.13
19	0.12	0.10	-40.36	19	0.14	0.11	140.26
20	0.01	0.01	-53.63	20	0.05	0.05	20.82

〈표 4〉 전압 고조파 왜형률 분석값

V1	V1_THD	V2	V2_THD
IEEE	3.24 [%]	IEEE	2.63 [%]
NEMA	100.05 [%]	NEMA	100.03 [%]
Frequency	60 Hz	Frequency	60 Hz



〈그림 1〉 고조파 spectrum

표3에서의 기본 Data를 이용하여 표4에서와 같이 전압왜형률을 구한 결과, 기본파성분값의 포함여부에 따라 최고 38배의 차이가 발생하고 있음을 알 수 있다. IEEE 519를 인용하지 않고 NEMA PE-5를 인용한 충전기에 대한 산업기준 KEPIC EEH1000으로 계산한 THD값은 5[%]를 초과하고 있다. 따라서, NEMA Value을 번역한 국내 산업기준은 원자력

산업뿐만 아니라 계통사업자가 관리하고 있는 제한값을 만족하지 못하여 적합하지 않은 기준임을 보여주고 고조파 왜형률을 최소화하기 위한 적합하고 타당한 기준인 Utility로부터 계검토가 필요하다. 그리고, NEMA에서 언급한 선형부하만을 포함할 경우라도, 기본파가 아주 작아도 하여도 100[%]를 초과하게 됨을 인지하여야 한다. 따라서, 단지 이론적인 가정에만 국한될 수밖에 없다.

그림1은 표3의 자료를 이용하여 고조파 스펙트럼으로 3고조파 성분이 다른 고조파성분보다 증가함을 보여주고 있다.

2.5 불평형을 계산법

전력계통의 불평형률은 크게 3가지로 부하불평형률(Load Regulation), 설비불평형률(Facility Regulation), 전압불평형률(Voltage Regulation)로 대별되며 각각의 계산식은 아래와 같이 나타낼 수 있고 현장에서 유용하게 사용하고 있다.

LR은 각 상 전류의 평균값에 대한 중성선 전류값의 비로

$$LR = \frac{I_n}{(I_a + I_b + I_c)/3} \times 100[\%]$$

$$I_n = \sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 - I_a I_b - I_b I_c - I_c I_a} [A]$$

FR은 3상3선식 선로를 기준으로 각 선간의 단상부하 총 설비용량의 최대와 최소부의 차를 총설비용량으로 나눈 값이고

$$FR = \frac{\text{각 선간 접속된 단상부하 총설비용량의 최대와 최소의 차}}{(\text{총 부하의 설비용량})/3} \times 100[\%]$$

VR은 정상분과 역상분에 대한 비로 $VR = \frac{V_2}{V_1} \times 100[\%]$ 와 같다.

3. 결 론

현대사회는 다양한 전기기기의 보급과 소비자의 권익이 증대함에 따라 전력품질 향상을 위해 Utility들은 최선의 노력을 경주하고 있다. 전력전자소자의 변환장치, 자기포화장치 및 아크로 등의 비선형부하의 사용이 증가함에 따라 고조파발생은 불가피하고 이를 일정 허용범위 내로 제한하기 위해 대규모수용가에서는 자체 보상설비를 구비하여 운영하고 있으며 역률보상장치와 요금에 대한 경제적인 부담을 이종으로 갖고 있는 실정이다.

본론에서 언급한 바와 같이 국내기준이 일부에 의해 제정되어도 기준의 적용에 대한 적합성에 대해 이해가 부족한 측면에서 해외기준을 인용, 적용함에 따라 규제현장에서의 부적합사항이 증가하고 있는 환경이다. 이로 인해 심·검사를 수행하는 저자로 하여금 설계자와 사업자의 결과물에 적용기준, 내용의 적합성 및 타당성에 대한 확인단계를 추가적으로 수행하고 있어 불필요한 시간과 비용이 낭비되고 있는 실정이다.

해외기준을 국내기준으로 활용하고자 하는 일련의 활동에는 비경험자에 의한 번역수준은 바람직하지 않으며 이는 현장에 적용하기도 어렵다. 이에 관련분야에 실무적이고 국제 감각을 갖고 있는 전문가들에 의한 검토를 활용하는 것이 부적합사항을 최소화할 수 있을 것이고 보다 나은 전력계통의 품질을 향상시킬 수 있으며 내용의 적합성 평가를 통해 전력계통에 대한 안전성을 확보할 수 있고 나아가 대국민에게는 신뢰성이 보장받을 수 있을 것이다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] ANSI/IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems
- [2] ANSI/IEEE Std 1159-1995. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality
- [3] NEMA Standards Publication PE 5-1997(R2003), Utility Type Battery Chargers
- [4] KEPIC EEH 1000-2000, 충전기
- [5] SK#2, Safety Injection Inverter Harmonics Analysis Data, 2010