

지하철 전력계통의 고조파 영향 분석 및 그 대책에 관한 연구

論 文

51B-4-8

Analysis of Harmonic Effects on Substation Power System and its Countermeasure

宋 晉 鎬* · 黃 有 模**

(Jin-Ho Song · Humor Hwang)

Abstract - We analysed the effect of harmonics on electric machines of substation power system based on quantitatively measured harmonics and proposed the methods for prevention of harmonics through checking on transformer, rectifier and cable's capacities against harmonics with reference to KEPCO's electricity service standard.

In order to analysis harmonics of silicon rectifier that is power source in DC substation, computer simulations for a substation with TR of high voltage distribution switchboard are performed. Simulation results show that the total harmonic distortion factor becomes smaller for TR primary and receiving points in order rather than silicon rectifier which is harmonic generation source so that the harmonics generated from each rectifier are outflowed to power supply and high voltage distribution switchboard. The result of higher distortion factors of voltage and current for rectifier with 100% load than those with 50% and 30% indicates that the waveform of voltage and current for the real substation power system at the office-going and the closing hours with heavy loads might be more distorted.

As proposed methods for harmonic reduction, the conventional 6 pulse-type for substation is required to be replaced by 12 pulse-type for reduction of 5th and 7th harmonics. The active filter rather than the passive filter is more effective due to severe variance of rectifier loads, but the high cost is price to be paid.

In view of installation area and costs, the use of 12 pulse-type transformer is desirable and then the parallel transformer and the rectifier within the substation must be replaced at the same time. Other substations with parallel feeder can use 6 pulse-type transformer.

Key Words : harmonic effects, substation power system, THD, 12-pulse type transformer, active filter

1. 서 론

전력전자 기술의 급격한 진보에 따라 가전 및 사무자동화 기기로 부터 전철 등 각종 산업기기에 이르기까지 폭넓게 반도체 응용기기가 보급되어 있다. 그에 따라 고조파 전류에 의한 전력계통의 전압왜형이 증대하고 그 결과 배전망에서의 각종 장애가 발생하여 고조파 장애가 심각한 문제로 대두되고 있다.

일반적으로 고조파는 노이즈와 비교해서 수kVA에서 수백 kVA 정도로 파위가 크고, 전파거리도 수km에서 수십km로 길며, 전력회로망을 통해 전파해 가기 때문에 광범위하게 걸쳐 각종 장애를 일으키는 특징이 있다.

직류급전용 변전소에서는, 수천kW급 대용량의 정류기부하가 계통에 접속되어 있기 때문에 이것이 고조파 발생원이 되어 많은 고조파전류가 유출할 가능성이 있다. 이같은 고조파 장애를 경제적으로 또 확실하게 방지하는 대책을 위해서는 배

전선로에 발생한 고조파를 정량적으로 파악하는 것이 필요하다[1].

문헌 [2]에서는 실제 운영중인 대전력 고전압 계통의 제1 공장 수전설비에서 전압별 모선과 부하의 특성에 따라서 17 개소를 선정하여, 실제로 발생하는 고조파 성분을 실측하고 분석하여 기존 및 증설분에 대한 고조파 방지대책을 검토한 경험이 있다.

본 논문에서는 지하철 전력계통의 고조파 발생량을 정량적으로 측정하여 고조파가 기기에 미치는 영향을 분석하고 변압기, 정류기, 케이블 등의 고조파에 대한 용량 검토를 통하여 고조파 방지대책을 제안한다. 고조파 측정대상은 강변, 성수, 상왕십리, 낙성대, 대림, 신림, 제기, 종로5가, 을지로3가, 독립문, 합정, 영등포구청, 서초 등 13개 변전소(substation: S/S)이고 측정기간은 2개월로 하였다.

일반적으로 고조파측정은 전압측정과 전류측정이 있다. 특정시설 내에서 고조파의 영향을 평가하는 경우는 전압측정을, 고조파 발생원의 기기로부터 발생하고 있는 고조파를 파악하는 경우에는 전류측정을 각각 수행한 고조파 측정 분석 시스템은 퍼스널 컴퓨터와 파형분석기록계 2대로 구성하였으며, 최대로 전압 3개소 및 전류 9개소에 대하여 동시 다점 측정이 가능하도록 하였다.

전압 왜형율이 한국전력공사의 규제치 이내에 있는지의 여

* 正 會 員 : 明知大學 情報制御工學科 博士課程

** 正 會 員 : 明知大學 情報通信工學部 副教授

接受日字 : 2001年 1月 15日

最終完了 : 2002年 3月 13日

부를 확인하기 위해서 수전점에 대해서 각상에 대한 전압 및 전류를, 그리고 고조파 발생원인 실리콘 정류기의 몰드 TR 1차측의 R상(3대) 및 고배용 TR 1차측에 대하여 전류를 각각 측정하였다. 측정은 계기용변압기(PT) 및 변류기(CT) 2차 회로의 전압 및 전류테스트 단자에서 실시하였다.

2. 고조파 영향 및 측정결과 분석

2.1 변압기

전력계통에 존재하는 고조파는 각종 장애의 원인이 되어 기기의 기능이나 성능에 좋지 않은 영향을 미친다. 변압기도 고조파에 의한 손실이나 소음과 밀접한 관계가 있으며, 그것을 대별하면 고조파 전류에 의한 손실증가와 전압파형의 왜형에 의한 무부하손실 및 소음 등이 있다.

변압기의 부하손실은 주파수와 관계가 없는 저항손과 주파수와 관계가 있는 표류손실로 이루어진다. 부하전류 중에 고조파 전류가 포함되면 부하손실은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$W = I_1^2 R [(1 + \beta) + \sum_{n=2}^N \alpha_n^2 (1 + \beta n^m)] \quad (1)$$

여기서 n 은 고조파 차수, β 는 표류손실계수, m 은 계수, I_1 는 기본파 전류, 그리고 $\alpha_n = \frac{I_n}{I_1}$ 는 고조파 함유율을 각각 나타낸다. 식 (1) 우변의 제2항이 고조파 전류에 의해서 발생하는 부하손실이다. 부하손실의 증가는 고조파 함유율 α_n 과 변압기 권선 굵기, 권선의 형상 및 배치, 외함의 구조 등과 관계있는 표류손실 계수 β 및 계수 m 에 의해서 결정된다.

식 (1)에서 등가 용량계수 K_b 를 다음과 같이 정의하면,

$$K_b = \left[\frac{(1 + \beta) + \sum_{n=2}^N \alpha_n^2 (1 + \beta n^m)}{1 + \beta} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

부하손실과 같은 손실을 주는 상용주파수의 등가 기본파전류 I_e 는 $K_b I_1$ 과 같게되어 부하손실의 측면에서 변압기의 부하전류가 K_b 배 만큼 증가한 결과가 된다. 즉, 변압기 용량에 여유가 없는 경우는 고조파 전류의 유입시 부하전류를 $\frac{1}{K_b}$ 배 만큼 줄여서 사용하여야 한다. 따라서 설비용량에 대한 변압기 용량의 검토시는 고조파 전류의 유무 및 크기 등을 사전에 충분히 검토할 필요가 있다.

가장 많이 사용되고 있는 6펄스 변환장치에서 발생하는 고조파 전류의 차수 $n = 6m \pm 1 (m = 1, 2, 3, \dots)$ 이 되고 이론적인 최대치는 $I_n = \frac{I_1}{n}$ 이 된다. 실제로 교류측 삼상분 임피던스가 변환장치 개개의 점호 펄스와 일치하지 않는 등의 원인으로 이론적 최대치 이외의 비이론(非理論) 고조파도 발생한다. 표 1은 6펄스 변환장치의 고조파 차수에

대한 고조파 전류 함유율(%)의 계산값을 나타낸다.

표 1 6 펄스 변환장치의 고조파 전류 함유율(%)
Table 1 Ratio of harmonic current contents of 6 pulse converter(%)

차수	1	5	7	11	13	17	19	23	25
함유율(%)	100	20	14	9.1	7.7	5.9	5.3	4.3	4.0

최저 차수의 5차 고조파 함유율을 알 수 있으면, 고차 고조파의 함유율도 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\alpha_n = \frac{5 \times \alpha_5}{n} \quad (n = 7, 11, 13, \dots) \quad (3)$$

그림 1은 표준변압기에 대해서 식 (1)과 식 (3)을 적용하여 5차 고조파 함유율을 변수로 하여 25차까지의 고조파를 고려한 부하손실의 증가경향을 나타낸 것이다. 계산시 β 는 0.1~0.2, m 은 1을 사용하였다. 표준 변압기와 특성이 다른 각각의 변압기에 대해서는 그 값이 당연히 달라진다.

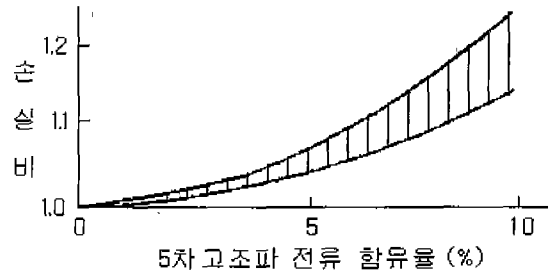


그림 1 고조파 전류와 부하손실과의 관계

Fig. 1 Load loss vs harmonic currents

계통 말단에 고조파 전류 발생원이 있으면 전압파형이 왜형파가 될 수 있다. 전압파형의 왜형률은 계통 임피던스에 비례한다. 변압기 여자전압이 정현파인 경우는 자속파형도 정현파이지만, 여자전압이 고조파를 함유한 왜형파이면 자속파형도 일그러져 무부하손실의 값이 변한다.

무부하손실의 대부분은 규소강판에서 발생하는 철손이고, 철손은 히스테리시스손과 와전류손으로 이루어진다. 히스테리시스손은 주파수와 여자전압의 평균치와 함수관계에 있고, 와전류손은 여자전압 실효치의 2승에 비례하므로 철손 W_i 는 다음 식으로 나타낸다.

$$W_i = C_1 f \left(\frac{E_a}{f} \right)^m + C_2 (K_f E_e)^2 \quad (4)$$

여기서 E_a 와 E_e 는 각각 여자전압의 평균치와 실효치를 나타낸다. 그리고 $K_f = E_e / E_a$ 는 전압 왜형률, f 는 주파수, 그리고 C_1, C_2, m 은 정수이다.

고조파를 함유할 경우, 철손 계산법에 의해서 식 (4)는 다

음과 같게된다.

$$W_i = W_o (W_{ho} + K_F^2 \times W_{eo}) \quad (5)$$

여기서 W_o 는 정현파 철손, W_{ho} 와 W_{eo} 는 각각 상용주파로 사용되는 자속밀도의 히스테리시스 성분과 와전류 성분을, 그리고 K_F 는 평균치 전압의 지시값에 대한 실효치 전압의 지시값에 대한 비를 나타낸다.

식 (5)는 누설자속의 통로가 존재하는 경우는 평균전압계의 지시값으로 최대자속밀도를 구하지 못하기 때문에 부적합하지만, 특수한 용도의 변압기를 제외하고 통상 사용되는 변압기의 철손을 구하는 식으로 이용할 수 있다.

변압기가 고조파 전류나 전압 왜형의 영향을 받아 손실이 증가하는 경우의 장애현상은 통상 온도상승으로 나타난다. 변압기유의 온도상승 θ_o 는 기본파 성분에 의한 손실시의 변압기유 온도상승을 θ_1 으로 하면, $\theta_o = \theta_1 \times$ (고조파 성분을 합한 전손실/기본파 성분에 의한 전손실)로 표현된다. 또한 권선의 온도상승 $\Delta\theta_o$ 는 등가전류 I_e 를 사용하여, $\Delta\theta_o = \Delta\theta_1 \times \left(\frac{I_e}{I_1} \right)^{1.6}$ 로 되고, $\Delta\theta_1$ 는 기본파 전류 I_1 를 흘린 경우의 권선온도 상승에 해당된다.

변압기 소음의 주 원인은 자기왜형(磁氣歪形)에 의한 것이다. 철심의 자왜진동(磁歪振動)에 의한 진동 주파수는 여자주파수의 2배를 기본파로 하는 여러 배의 주파수 성분으로 이루어진다. 고조파 전류에 의해 여자전압이 왜형파가 되면 여자전압 자신이 고조파를 함유하는 것이 되므로 진동이 증가하여 소음도 증가한다. 이러한 소음을 인간의 귀에 들을 수 있는 소리로서 파악하는 경우, 그림 2의 Fletcher-Munson의 청감곡선[1]을 사용하고 있다. 종축에 표시된 음압레벨은 10^{-16} W/cm^2 의 음세기에 해당하는 $0.0002 \mu \text{ bar}$ 크기를 갖는 기준음압에 대한 측정음압의 비를 dB로 나타낸 것이다.

진동주파수가 1kHz에 가까이 가면 청감도가 좋기 때문에 진동에 의한 소음은 한층 더 크게 된다. 전원전압의 왜형 정도에 의해 정현파 전압 인가시에 측정된 값보다 5~10 [phone] 정도의 소음치가 증가된다는 보고도 있다.

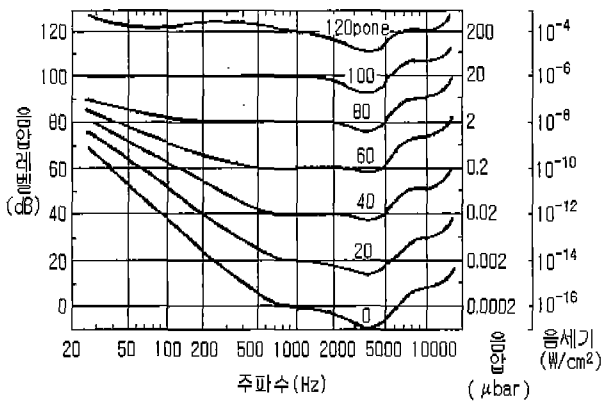


그림 2 Fletcher-Munson 의 청감곡선
Fig. 2 Fletcher-Munson's hearing curve

2.2 전선로

내선규정에 의하면 배선의 고조파 영향은 기계기구의 전로를 제외한 강전의 전송에 사용하는 전로의 문제로서 파악해야 한다. 따라서 전선의 고조파 전류에 의한 허용전류의 변화, 배선방식에 의한 고조파 전류의 분포 및 포설방법에 의한 유도장해가 문제가 된다.

고조파는 기본파 주파수의 n 배 파형이기 때문에, 고조파 회로의 계산은 왜형파를 푸리에급수에 의한 각 차수별 고조파로 분해하여, 각 차수별 고조파마다 회로계산을 실시하고, 이것을 중첩된 왜형파로서 전압, 전류의 관계를 구한다.

고조파 전류에 의한 전선 허용전류[3]의 변화를 고려할 경우, 우선 기준이 되는 전류값에 고조파 함유량에 의한 전류 변화량을 알아야 한다. 전류파형에 고조파 성분이 함유되는 경우의 실효치는 직류분을 무시하면 각 차수별 고조파 실효치 전류의 2승 합을의 평방근이 된다.

전선의 허용전류는 전선의 최고 허용온도와 기준 최저온도와와의 차인 온도상승한도와 이것에 대한 전선의 발열량과 방열계수의 비로 결정된다. 따라서 전선의 굵기, 시공조건이 같은 경우는 방열계수가 동일하기 때문에 허용전류의 고조파특성에 대한 도체의 온도 및 발열량이 일정하므로 교류 도체저항의 변화만 고려하여, 그 변화에 대한 허용전류를 보정하면 된다.

도체온도를 일정하게 할 경우 교류 도체저항 R_A 는 다음과 같이 나타낸다.

$$R_A = R_D(1 + \lambda_s + \lambda_p) \quad (6)$$

여기서 R_D 는 특정온도에 있어서의 직류도체저항, λ_s 와 λ_p 는 각각 표피효과계수와 근접효과계수를 나타낸다.

동일 온도조건에서 기본파 전류에 의한 교류 도체저항 R_{A_1} 과 고조파 전류에 대한 교류 도체저항 R_{A_n} 의 비를 β_n 이라 하면, 기본파 전류에 고조파 전류가 함유될 경우 그 전류에 의한 도체의 발열 W 는 다음과 같이 표현된다.

$$W = R_{A_1}(I_1^2 + \beta_2 I_2^2 + \beta_3 I_3^2 + \dots + \beta_n I_n^2) \quad (7)$$

각 차수별 고조파 전류성분의 기본파 전류치에 대한 함유율을 x_n 이라하면 식 (7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = I_1^2 R_{A_1}(1 + \beta_2 x_2^2 + \beta_3 x_3^2 + \dots + \beta_n x_n^2) \quad (8)$$

고조파 전류에 의한 교류 도체저항 R_A 가 변화하지 않고 가정할 경우, 교류전류의 실효치가 같으면 도체의 발열은 고조파의 함유율에는 관계없는 것으로 되기 때문에 식 (8)은 다음과 같다.

$$W = I_s^2 R_A (1 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2) \quad (9)$$

따라서, 식 (8)의 발열량과 식 (9)의 발열량이 같으면 고조파 성분을 함유하는 전선의 허용전류 감소율 γ 의 일반식은

다음과 같게 된다.

$$\gamma = 1 - \sqrt{\frac{1 + x_2^2 + x_3^2 + \dots + x_n^2}{1 + \beta_2 x_2^2 + \beta_3 x_3^2 + \dots + \beta_n x_n^2}} \quad (10)$$

본 논문에서는 실제적인 고조파 전류성분에 의한 허용전류의 감소율의 개략적인 수치를 계산하기 위해서, 전력케이블의 허용전류에 대한 일본전선공업회규격 JCS-168-C[3]에서 표피효과계수 및 근접효과계수의 계산식을 인용하였다.

3, 5, 7차 고조파에 의한, 중도체 CV 600V 및 6,600V케이블에 대해서 λ_s 와 λ_p 를 구한 다음, 고조파 차수의 영향을 정성적으로 나타내기 위해서 단일 고조파 성분만이 있는 경우는 허용전류의 감소율을 다음과 같이 간략하게 계산할 수 있다.

$$\gamma_n = 1 - \frac{\sqrt{1 + x_n^2}}{1 + \beta_n x_n^2} \quad (11)$$

표 2와 3은 각각 고조파 전류에 대한 도체 저항비 및 허용전류의 감소율에 대한 계산 값들을 나타낸다.

표 2 고조파전류에 대한 교류도체 저항비(β_n);(a)기본파,3조파

Table 2 Resistance ratio of AC conductors vs harmonic currents(β_n);(a)1st, 3th, (b)5th harmonics

도체 종류	직류도체 저항 R_D Ω/km 90°C	기본파(60Hz)			3조파(180Hz)			R_A (180) / R_A (60) β_3
		표피 효과 계수 λ_s (60)	근접 효과 계수 λ_p (60)	교류도체 저항 Ω/km R_A (60)	표피 효과 계수 λ_s (180)	근접 효과 계수 λ_p (180)	교류도체 저항 Ω/km R_A (180)	
600V, 6600V CV 100mm ² ×1C	0.233	0.0021		0.234	0.0193		0.237	1.017
325mm ² ×1C	0.0742	0.0221		0.074	0.1752		0.085	1.150
600V CV 100mm ² ×3C	0.0238	0.0020	0.0022	0.239	0.0185	0.0188	0.247	1.033
325mm ² ×3C	0.0738	0.0213	0.0256	0.077	0.1695	0.1486	0.097	1.259
6600V CV 100mm ² ×3C	0.238	0.0020	0.0013	0.239	0.0185	0.0118	0.246	1.072
325mm ² ×3C	0.0738	0.0213	0.0189	0.077	0.1695	0.1102	0.094	1.230

(b)

도체 종류	직류도체 저항 R_D Ω/km 90°C	5조파(300Hz)			
		표피 효과 계수 λ_s (300)	근접 효과 계수 λ_s (300)	교류도체 저항 Ω/km R_A (300)	R_A (300) / R_A (60) β_5
600V, 6600V CV 100mm ² ×1C	0.233	0.0521		0.245	1.050
325mm ² ×1C	0.0742	0.3942		0.101	1.364
600V CV 100mm ² ×3C	0.0238	0.0500	0.0470	0.262	1.092
325mm ² ×3C	0.0738	0.3836	0.2482	0.120	1.559
6600V CV 100mm ² ×3C	0.238	0.0500	0.0296	0.257	1.076
325mm ² ×3C	0.0738	0.3836	0.1841	0.116	1.507

표 3 고조파에 의한 허용전류의 감소율(γ_n)

Table 3 Reduction ratios of allowable currents vs harmonics(γ_n)

도체 종류	β_3	3차 고조파(180Hz) γ_3 (%)					5차 고조파(300Hz) γ_5 (%)					
		x_3^2					x_5^2					
		0.01	0.04	0.09	0.16	0.25	0.01	0.04	0.09	0.16	0.25	
600V 및 6600V CV 케이블 100mm ² ×1C	1.017	0.01	0.04	0.07	0.12	0.17	1.050	0.03	0.10	0.21	0.34	0.50
325mm ² ×1C	1.150	0.07	0.29	0.61	1.02	1.47	1.364	0.18	0.69	1.47	2.42	3.45
600V CV 케이블 100mm ² ×3C	1.033	0.02	0.06	0.14	0.23	0.33	1.092	0.05	0.19	0.38	0.63	0.91
325mm ² ×3C	1.259	0.13	0.49	1.05	1.74	2.49	1.559	0.28	1.06	2.23	3.65	5.16
6600V CV 케이블 100mm ² ×3C	1.027	0.01	0.05	0.11	0.19	0.27	1.076	0.04	0.15	0.31	0.52	0.75
325mm ² ×3C	1.230	0.11	0.44	0.94	1.55	2.22	1.507	0.25	0.96	2.03	3.32	4.71

3상 교류에는 상회전 방향이 있고, 기본파 상회전의 방향을 정상으로 하면, 각 기수 고조파의 상회전의 방향은, 정상분은 7, 13, 19, 25차, . . . 즉, $(6N+1)$, 영상분은 3, 9, 15, 21차, . . . 즉, $(6N-3)$, 그리고 역상분은 5, 11, 17, 23차, . . . 즉, $(6N-1)$ 으로 된다.

3상 3선식 회로에서 영상분은 전류통로가 없는 것으로 선전류에는 함유되지 않지만, 3상 4선식 회로의 중성선에는 각 상의 부하가 평형하고 있더라도 부하에 고조파 전류 발생원이 있으면, 그림 3에 표시한 바와 같이 $(6N-3)$ 의 영상분 고조파 전류의 3배의 전류가 흐르게 된다[4].

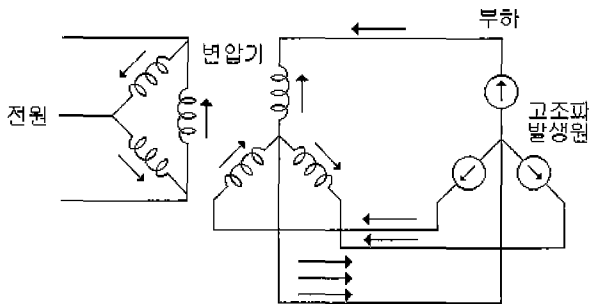


그림 3 3상 4선식 회로의 영상분 고조파 전류통로
Fig. 3 Current paths of zero-phase harmonics for three-phase four-wire circuit

각 상의 부하전류에 기본파 전류에 대한 40%의 3차 고조파 전류가 함유되었다고 하면, 각 상의 전류는 기본파 전류의 107.7%가 되지만 중성선에는 $40\% \times 3 = 120\%$ 의 3차 고조파 전류가 흘러 각상의 선전류는 매우 큰 값이 된다.

3배수 고조파가 계통에 미치는 영향은 다른 고조파들과는 완전히 다르고, 중성선으로의 전류 흐름을 가지는 Y-접지 계통에서 고조파 장애현상이 많이 발생한다. 일반적으로 나타나는 두 가지 문제는 중성선 과열과 통신선 장애이다. 3배수 고조파에 의한 중성선의 전압강하 때문에 발생하는 상-대지 간 전압의 왜형파에 의해 기기의 오동작이 발생하는 경우도 많다. 중성선에는 기본파 전류 성분은 없지만, 3차 고조파 성분은 각 상의 3차 고조파 전류들이 위상과 시간면에서 동일하므로 각 상별 3차 고조파 전류의 3배가 된다.

변압기 결선방식은 단상 비선형 부하에서 발생하는 3배수 고조파 전류의 흐름에 대한 영향을 결정하는 중요한 요소이다. Y-Δ 변압기에서, 3배수 고조파 전류는 Y결선측으로 유입하고 있다. 이러한 3배수 고조파 전류는 각 상에 존재하고, 중성선에서 합쳐진다. Δ결선은 3배수 고조파 전류가 흐르도록 암페어-턴을 평형으로 유지시키지만, 3배수 고조파 전류는 Δ결선상에 순환하고 Δ측 선로 전류에는 나타나지 않는다. 3배수 고조파 전류는 전류가 평형을 이루는 경우에만 영상 전류가 된다.

전원품질 분석과 관련된 몇 가지 중요한 의미를 살펴보면, 변압기(특히 중성선을 가지는 변압기)는 Y-결선측의 단상부하에 3차 고조파 성분이 많이 함유된 경우에는 과열되기 쉽다. Y결선중 한쪽 또는 양쪽 모두에서 중성선 결선을 제거하면, 3배수 고조파의 흐름은 차단될 것이다. 이 때, 암페어-턴이 평형을 이루는 부분은 없다. 마찬가지로, Δ결선은 선로로

부터의 흐름을 차단한다. 3권선 변압기는 3차 권선을 Δ권선으로 사용하고 있는 점에 주목할 필요가 있다. 따라서, 오직 하나의 중성점을 가지는 Y-Y 결선의 경우에는 3배수 고조파를 흐르게 한다.

변압기에서 3배수 고조파의 흐름은 예상하지 못한 위치에서 아주 잘 나타난다. 정상적인 상태에서 3배수 고조파는 영상분이 되어야 한다. 그러나, 불평형인 경우에는 3배수 고조파는 정상분 또는 역상분이 될 수 있다. Δ-Δ 변압기를 통하여 전원을 공급받겠다고 하여도, 불평형한 상태로 운전하게 되는 아크로와 같은 설비가 있는 경우에는 막대한 3차 고조파가 흐르게 된다.

2.3 기타설비

통신설비는 기기별로 고조파에 의한 유도장해 대책이 수립되고 있는 경우가 대부분이고, 이들 기기를 연결하는 배전선에 대해서도 충분히 고려해야 된다. 통신설비에 미치는 고조파 영향중의 하나는 인간의 청각에 관한 문제이다. 고조파 전류가 흐르고 있는 배전선에 근접하여 전화 등의 통신선이 포설되어 있는 경우, 전자유도에 의해 통신선에 노이즈가 발생한다. 이 노이즈 주파수는 수백에서 수천Hz로 그림 2의 Fletcher-Munson의 청감곡선에서 나타난 것과 같이 인간의 가청 주파수 대역과 일치하기 때문에 문제가 된다.

노이즈에 의한 통신장애는 전력선의 전압이나 전류에 의해서 전화선에 여러 가지의 주파수로 유도되는 노이즈가 상대적인 방해효과를 주는 양에 대한 척도로 사용되는 TIF(Telephone Interference Factor) 평가지수를 기준으로 하여 노이즈 주파수의 증첩, 귀의 감도, 신호대 노이즈비(S/N) 등으로 평가한다.

유도원관형 과전류계전기는 전력설비의 과전류 보호용으로 널리 사용하고 있다. 그림 4는 수변전설비의 일반적인 계통도이다.

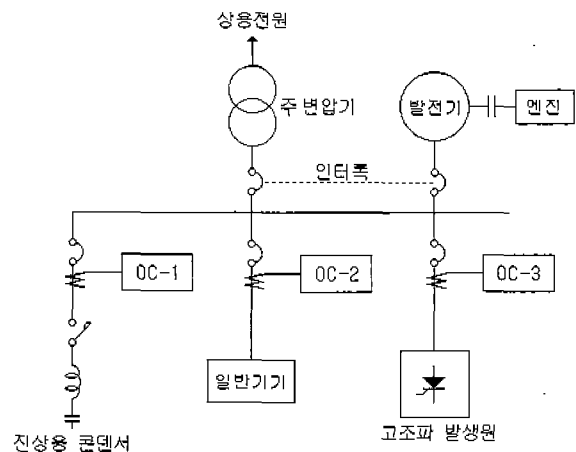


그림 4 수변전 설비 계통도

Fig. 4 Substation system

그림 4에서 OC-1, 2, 3으로 표시된 과전류계전기는 고조파 전류 발생원인 사이리스터 기기 등에 의해서 원래의 동작특성에서 벗어난다. 실제로 과전류계전기의 형식이나 제작사에

따라서 특성에 차이가 있지만, 고조파 함유율이 높을수록, 고차 고조파가 될수록 유도원관형 과전류계전기 동작오차가 크다.

과전류계전기의 주파수 특성에 의하면 5차, 7차 고조파로 주파수가 높아짐에 따라서 계전기 동작값의 오차가 크다. 오차의 절대치는 형식 및 사용법에 따라 다르기 때문에 일률적으로 정의할 수 없지만, 현실적으로 사용회로의 고조파 함유율이 20% 이하로 예상되면, 회로에 공진현상이 없는 것으로 가정하여 계전기의 탭, 레버를 적절히 설정하면 실용상 지장이 없을 것이다.

2.4 고조파 측정 결과 및 분석

고조파 측정대상인 13개소 변전소에 대한 측정결과 중에서도 표 4는 전압의 고조파 총합왜형률(Total Harmonic Distortion Factor: THD)이 가장 높게 나타난 대림 변전소의 총합왜형률, 대표적인 고조파 차수 및 함유율에 관한 고조파 발생현황을 나타낸다.

표 4 대림 S/S의 고조파 발생 현황

Table 4 Generation of harmonics at Daelim S/S

S/S	측정지점	총합 왜형률 (THD%)	측정값 (kV·A)		대표적인 고조파 차수 및 함유율				
			기본파	합계	차수	%	차수	%	
대림	수전	전압	5.49	23.16	23.19	5	3.84	7	3.56
		전류	21.88	240.71	246.39	5	18.38	7	10.28
	분기	1호계	22.28	41.40	42.41	5	18.4	7	10.72
		2호계	22.53	42.59	43.63	5	18.77	7	10.28
		3호계	24.27	41.00	42.19	5	19.12	7	10.39

고조파와 관련된 국내·외 규정은 여러 가지가 있으나 여기서는 한국전력공사의 전기공급규정[5]에 준하여 분석하고자 하며 지중전선로 및 가공전선로에서 공급하는 경우 수전전압별 전압왜형률 및 등가방해전류에 대한 고조파 관리 기준의 내용은 표 5와 같다.

표 5 국내 고조파 관리기준(한국전력 전기공급규정)

Table 5 Harmonics maintenance standard(KEPCO electricity service standard)

구분	S/S(지중전선로)에서 공급하는 고객		S/S(가공전선로)에서 공급하는 고객	
	전압왜형률 (%)	등가방해전류 (A)	전압왜형률 (%)	등가방해전류 (A)
66kV이하	3	-	3	-
154kV이상	1.5	3.8	1.5	-

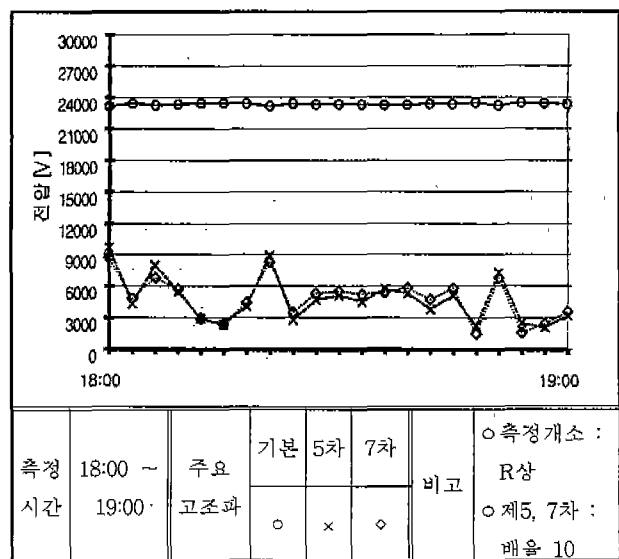
표 6은 13개소 변전소별 고조파 측정결과를 근거로 전압의 총합왜형률을 나타낸다. 수전전압 66kV이하의 전력계통에서는 고조파 전류왜형에 대한 억제기준은 없으며, 고조파 전압왜형에 대해서도 차수별 고조파 함유량에 대한 억제기준은 없고, 단지 THD에 대해서 3%이하로 규정되어 있다.

표 6 고조파에 의한 변전소별 THD 결과

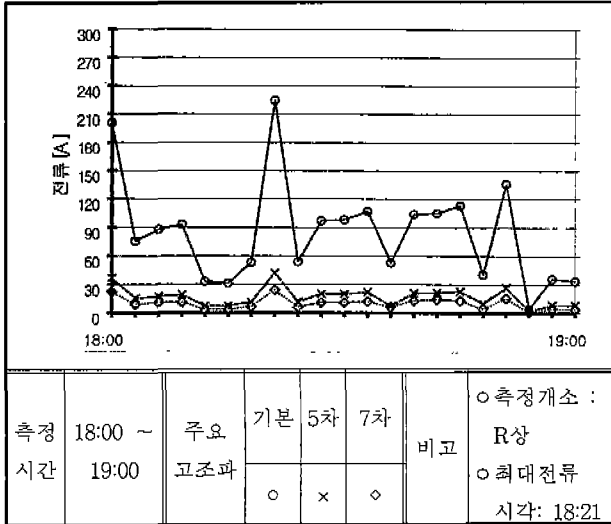
Table 6 THD of harmonics for substations

변전소명	수전점에서의 전압왜형률 (THD%)	결과	비고
강변	2.98	기준치 이내	6펄스 정류방식
성수	4.67	기준치 초과	"
왕십리	3.42	"	"
낙성대	4.3	"	"
신림	3.96	"	"
대림	5.49	"	"
계기	3.64	"	"
종로5가	2.43	기준치 이내	"
을지로3가	4.54	기준치 초과	"
영등포구청	3.27	"	"
합정역	2.96	기준치 이내	"
서초	2.97	"	"
독립문	1.14	"	12펄스 정류방식
합계	13개소(기준치 이내: 5개소,		

한전의 전기공급규정에 의하면, 수전전압 66kV이하의 전력계통에서는 고조파 전류왜형에 대한 억제기준은 없고 표 6의 측정결과에서 알 수 있듯이 6펄스 정류방식의 변전소에서의 수전점의 전압왜형률은 대부분이 기준치를 초과하고 있거나 기준치에 아주 근접하고 있다. 그러나 12펄스 정류방식인 3호선의 독립문 S/S에서의 측정치는 1.14%로 나타나고 있다. 13개 변전소에서 측정된 결과 중 대림S/S에서 측정된 결과로서 그림 5는 수전전압 및전류의 시계열 그래프, 그림 6은 수전전압 및 전류의 고조파 분석 결과물, 그림 7은 SR #1호기 및 #2호기용 TR 1차전류를 각각 나타낸다.



(a)



(b)

그림 5 수전전압 및 전류의 시계열 그래프(대림 S/S);

(a) 수전전압, (b) 수전전류

Fig. 5 Distribution of receiving voltage and currents vs times(Daelim S/S); (a) receiving voltage, (b) receiving currents

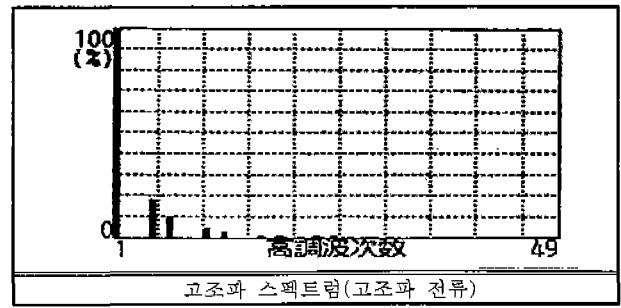
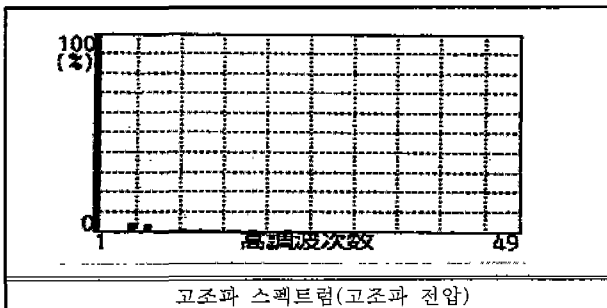
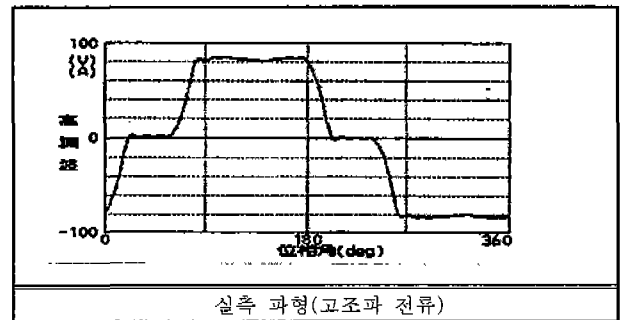
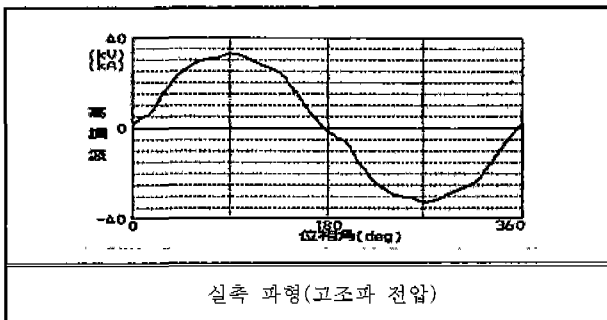
実効値・%表示 (%)

次	実効値	次	実効値	次	実効値
1	100.00	18	0.00	34	0.00
2	0.00	19	0.34	35	0.08
3	0.25	20	0.00	36	0.00
4	0.00	21	0.04	37	0.08
5	3.84	22	0.00	38	0.00
6	0.00	23	0.43	39	0.00
7	3.58	24	0.00	40	0.00
8	0.00	25	0.21	41	0.08
9	0.04	26	0.00	42	0.00
10	0.00	27	0.04	43	0.08
11	1.29	28	0.00	44	0.00
12	0.00	29	0.12	45	0.00
13	0.56	30	0.00	46	0.00
14	0.00	31	0.12	47	0.08
15	0.00	32	0.00	48	0.00
16	0.00	33	0.00	49	0.04
17	0.38				

차수별 고조파 함유율(고조파 전압)

총합 왜형과 (%)	주요고조파(%)		비교
	5차	7차	
5.49	3.84	3.56	합계 : 100.15%

(a)



実効値・%表示 (a)

次	実効値	次	実効値	次	実効値
1	100.00	18	0.00	34	0.00
2	0.15	19	1.09	35	0.46
3	0.15	20	0.00	36	0.00
4	0.00	21	0.00	37	0.46
5	18.38	22	0.00	38	0.00
6	0.00	23	0.93	39	0.00
7	10.28	24	0.00	40	0.00
8	0.00	25	0.93	41	0.46
9	0.15	26	0.00	42	0.00
10	0.00	27	0.00	43	0.31
11	4.51	28	0.00	44	0.15
12	0.00	29	0.62	45	0.00
13	2.95	30	0.00	46	0.00
14	0.00	31	0.46	47	0.15
15	0.15	32	0.00	48	0.15
16	0.00	33	0.00	49	0.31
17	1.24				

차수별 고조파 함유율(고조파 전류)

実効値・%表示 (b)

次	実効値	次	実効値	次	実効値
1	100.00	18	0.06	34	0.10
2	0.16	19	1.30	35	0.44
3	1.45	20	0.06	36	0.10
4	0.29	21	0.28	37	0.46
5	18.40	22	0.04	38	0.07
6	0.19	23	0.88	39	0.18
7	10.72	24	0.12	40	0.07
8	0.39	25	0.97	41	0.29
9	0.65	26	0.04	42	0.08
10	2.57	27	0.19	43	0.50
11	3.89	28	0.14	44	0.00
12	0.18	29	0.54	45	0.11
13	3.36	30	0.15	46	0.04
14	0.08	31	0.65	47	0.18
15	0.32	32	0.04	48	0.10
16	0.13	33	0.16	49	0.40
17	1.26				

차수별 고조파 함유율(SR #1호기)

총합 왜형파 (%)	주요고조파(%)		비고
	5차	7차	
21.88	18.38	10.28	합계 : 102.36%

총합 왜형파 (%)	주요고조파(%)		비고
	5차	7차	
22.28	18.40	10.72	합계 : 102.45%

(b)

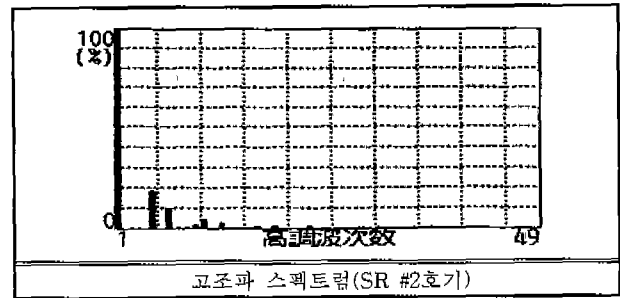
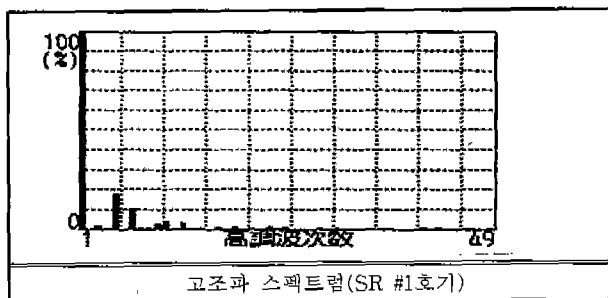
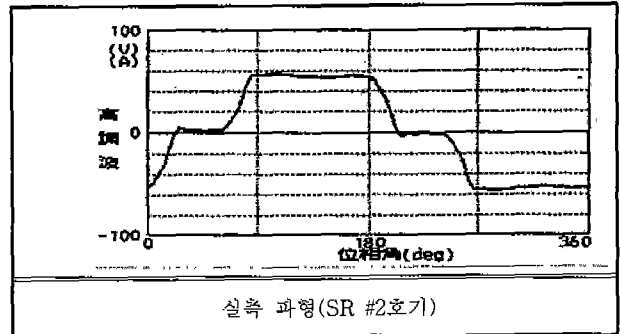
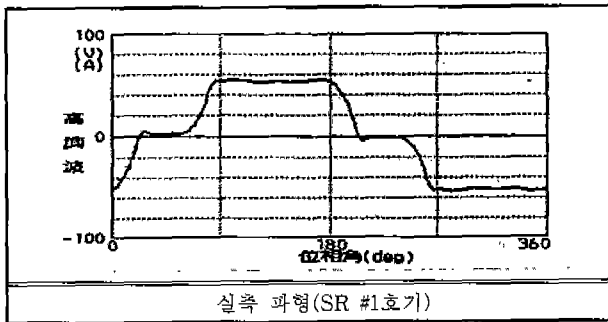
(a)

그림 6 수전전압 및 전류의 고조파 분석 결과(대림S/S);

(a)고조파 전압, (b)고조파전류

Fig. 6 Analysis results of harmonics for receiving voltage and currents(Daelim S/S);

(a) harmonic voltages, (b) harmonic currents



実効値・%表示 (%)

次	実効値	次	実効値	次	実効値
1	100.00	18	0.03	34	0.03
2	0.18	19	1.05	35	0.45
3	0.25	20	0.02	36	0.02
4	0.17	21	0.06	37	0.36
5	18.77	22	0.10	38	0.04
6	0.15	23	1.04	39	0.05
7	10.28	24	0.06	40	0.09
8	0.28	25	0.84	41	0.38
9	0.58	26	0.03	42	0.07
10	1.68	27	0.03	43	0.41
11	4.28	28	0.13	44	0.03
12	0.16	29	0.58	45	0.00
13	3.00	30	0.09	46	0.06
14	0.10	31	0.51	47	0.26
15	0.04	32	0.04	48	0.08
16	0.04	33	0.03	49	0.26
17	1.38				

차수별 고조파 함유율(SR #2호기)

총합 왜형과 (%)	주요고조파(%)		비고
	5차	7차	
22.53	18.77	10.28	합계 : 102.44%

(b)

그림 7 SR #1, #2호기용 TR 1차전류(대림S/S); (a)SR#1호기, (b)SR #2호기

Fig. 7 TR primary current of SR #1(Daelim S/S); (a) SR #1, (b)SR #2

3. 시뮬레이션에 의한 고조파분석 및 대책

직류전철의 전력공급원인 실리콘정류기에서 발생하는 고조파가 얼마나 발생되며, 또한 계통내에서 어떻게 분류되어 전파되어 가는지 알아보고자 고압배전반용 TR이 있는 1개변전소를 대상으로 컴퓨터 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션을 실시했다. 모의실험 계통도는 그림 8과 같다.

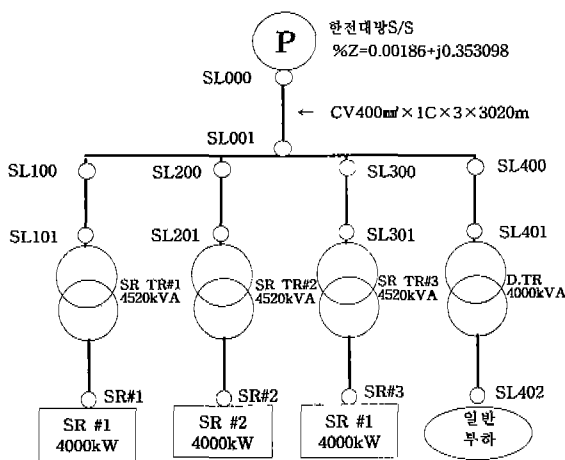


그림 8 모의실험 계통도
Fig. 8 System for simulation

시뮬레이션 모델은 3 가지 경우로서, 모델 1은 SR #1, 2, 3 각각 100% 부하시, 모델 2는 SR #1, 2, 3 각각 50% 부하시, 그리고 모델 3은 SR #1, 2, 3 각각 30% 부하시로 선정했다.

시뮬레이션 조건으로서 SR TR #1,2,3에는 6펄스 정류방식과 $%Z=1.25375+j12.5374$, 고압배전용 TR에는 50% 일정부하와 $%Z=0.55225+j5.52246$ 를 고려했다.

시뮬레이션 모델별로 계통조건을 변화시켜 노드별 전압의 총합왜형률과 분기(branch)별 전류에 대한 총합왜형률을 각각 표 7 및 표 8과 같이 얻었다.

표 7 전압의 총합왜형률(%)

Table 7 Voltage THD(%)

Node No.	Node명	모델1 (100%부하)		모델2 (50%부하)		모델3 (30%부하)	
		V(rms)	THD%	V(rms)	THD%	V(rms)	THD%
SL000	KEPCO S/S	22,946	6.36	22,912	3.18	22,904	1.91
SL001	수전점	22,822	7.47	22,838	3.72	22,850	2.23

표 8 Branch별 전류에 대한 총합왜형률(%)

Table 8 Current THD(%) by branches

구 분 Branch	모델1(100%부하)		모델2(50%부하)		모델3(30%부하)	
	I(rms)	THD%	I(rms)	THD%	I(rms)	THD%
SL000→SL001	359.21	18.49	203.86	16.23	142.37	13.89
SL100→SL101	103.43	22.75	51.68	22.76	31.03	22.75
SL200→SL201	103.43	22.75	51.68	22.76	31.03	22.75
SL300→SL301	103.43	22.75	51.68	22.76	31.03	22.75
SL400→SL401	51.64	6.84	51.40	3.43	51.33	2.06

모의실험 결과에서 알 수 있듯이 고조파 전류의 총합왜형률이 고조파 발생원인 실리콘 정류기보다도 정류기용 TR 1차측 그리고 수전점 순으로 총합왜형률이 작아짐으로서 각 정류기에서 발생하는 고조파가 전원측 및 고배측으로 유출되고 있다.

정류기가 100% 부하일 때가 50% 또는 30%부하보다도 전압 및 전류의 왜형이 커지므로 전철의 실 계통에서도 전철부하가 많은 아침, 저녁의 출퇴근 시간에 전압 및 전류에 대한 왜형이 많이 왜곡될 것으로 분석됐다. 이 결과는 그림 5의 대림 S/S에서 퇴근시간에 측정된 5차 및 7차 고조파 영향을 나타내는 수전전압 및 전류의 시계열 그래프 결과와도 일치한다.

직류전철 변전소에서의 고조파 억제 대책은 기설 변전소에 있어서의 대응성이나 보수성 등으로부터 $\Delta-\Delta$, $\Delta-Y$ 결선의 변압기를 이용하는 3상 브리지 병렬 12상 결선방식의 적용이 유리하다고 판단된다.

고조파 발생량 억제의 근원적 대책으로서 정류기용 변압기의 위상차를 이용한 다상화(또는 다중화)방식[6]-[8]을 이용할 수 있다. 전철용 정류기에서는 6상에서 12상으로 하는 것

이 현실적이고, 특히 5차 및 7차의 고조파 전류가 저감된다. 기설치된 정류기를 30° 위상차로 병렬운전을 하는 것을 그림 9에 나타냈다.

순환전류의 억제나 부하의 밸런스를 고려해 직류리액터(DCL) 방식이나 상간 리액터 방식이 유리하다. 또한, 3권선 정류기용 변압기와 그림 9와 같은 12펄스 정류기를 사용한 3상 브리지 직렬 12상 결선을 이용할 수도 있다.

직렬리액터와 콘덴서에 의한 동조 필터 또는 고차 필터로 고조파를 흡수하는 경우에는 고조파 유출전류의 억제를 위해서 정류기용 변압기 2차측에 설치할 필요가 있다. 하지만, 개폐시에 따르는 현상 등 해명되지 않는 사항이 있어 전철정류기용으로는 실용화 되지 않고 있다.

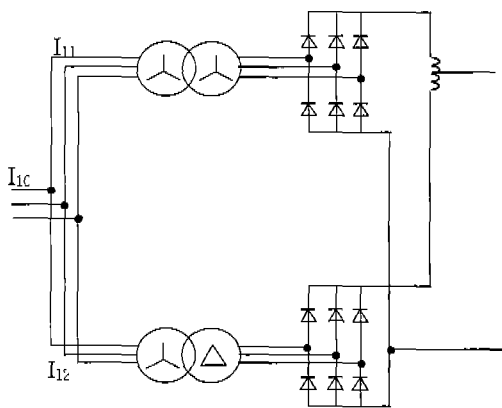


그림 9 3상 브리지 병렬 12상 결선
Fig. 9 Three-phase bridge connection with parallel 12-phase

GTO, IGBT 등 자기 소호장치를 이용한 펄스폭 변조(PWM) 제어자력식 인버터 방식[9]-[11]은 고조파전류와 역방향의 고조파전류를 발생시켜 고조파를 제거하는 것으로 알려져 있다. 정류기용량의 22% 정도의 장치용량으로도 저차의 임의의 고조파성분을 억제할 수 있지만, 병렬공진이나 고조파 확대의 우려는 없는 반면 그 비용이 비싸다.

지하철의 정류기용 부하는 변화량이 심하여 수동필터보다는 능동필터를 설치하여야 효과를 볼 수 있지만, 능동 필터 설치시 한 변전소당 약 6억원의 예산이 소요될 것으로 분석되었다.

이상으로부터 강변역변전소 등, 13개 변전소에 대하여 전압, 전류에 대한 고조파 측정 및 분석을 실시하고 일반적인 수용가와 직류전철변전소에서의 고조파억제대책을 언급하였는데, 현실성, 경제성 등을 고려할 때, 지하철공사에서 실시할 수 있는 대책으로서는 12펄스방식을 사용하고 있는 독립문S/S의 측정결과 및 6펄스방식의 시뮬레이션의 결과에서 알 수 있듯이 6펄스방식의 변전소에는, 제5차 및 제7차 고조파를 상당량 억제 할 수 있는 12펄스방식 변환장치로 운용 또는 교체하는 것이 효과적이다. 급후의 정류기 증설이나 교체 시에 있어서는 이 방법에 의해 고조파억제 대책을 경제적, 합리적으로 추진해 나가야 한다.

표 9는 고조파 저감대책을 위한 방식별 특성을 비교한 결

과를 나타낸다. 필터관련 항목 중 용적과 가격은 수동필터를 기준으로 한 값이다.

표 9 고조파 저감대책을 위한 방식별 특성비교
Table 9 Characteristics of methods for harmonics reduction

방식 항목	수동 필터	능동 필터	정류방식 개선 (펄스수 증대별)
억제 고조파 차수	<ul style="list-style-type: none"> ● 각 차수별로 설치 - 저차 고조파는 단일 동조 필터, 고 차 고 조 파는 2 차형 고 차 필터로 구성되어 2가지 조합하여 하나의 필터장치로 구성, 고조파를 저감 	<ul style="list-style-type: none"> ● 복수의 고조파 차수를 동시에 저감 	<ul style="list-style-type: none"> ● 12펄스 이상의 정류장치 에서는 저차고조파는 발생하지 않고, 11 차 이상 고차 고조파가 발생되며, 크기는 기본 파의 1/n(n:차수) 이므로 고조파에 의한 장해는 거의 없음
계통 임피던스 영향	<ul style="list-style-type: none"> ● 공진에 의한 고조파 확대 가능성이 있음 	<ul style="list-style-type: none"> ● 임피던스 영향은 없으나 다음 사항에 유의 - 보상대상으로 검출되는 부하 전류 성분중에 진상 콘덴서 전류가 함유되어 있으면 보상동작이 불안정 - 필터의 주된 구성요소인 인버터 스위칭동작에 의한 고조파가 주변회로 조건에 따라서 저감되지 않고 전 원측에 나타날 수 있음. 	<ul style="list-style-type: none"> ● 없음
무효전력 조정기능	<ul style="list-style-type: none"> ● 있음 - 필터소자의 콘덴서는기본파 에서는 역율개선 작용(고정) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 제어방식에 따라서 가능 	<ul style="list-style-type: none"> ● 제어방식에 따라서 가능
용 적	100%	100 ~ 200%	<ul style="list-style-type: none"> ● 6펄스 2 대를 직렬 혹은 병렬로 접속하여 12 펄스를 구성하는 경우 거의 0% ● 6펄스 설비를 12 펄스로 변경하는 경우 약 30~50%
필터 증설	<ul style="list-style-type: none"> ● 필터간 조정이 필요 	<ul style="list-style-type: none"> ● 쉽다 	<ul style="list-style-type: none"> ● 해당사항 없음
손 실	<ul style="list-style-type: none"> ● 장치용량의 1~2% 	<ul style="list-style-type: none"> ● 장치용량의 8~10% 	<ul style="list-style-type: none"> ● 해당사항 없음
가 격	1	10~14	<ul style="list-style-type: none"> ● 해당사항 없음

4. 결 론

본 논문에서는 지하철 전력계통의 고조파 발생량을 정량적으로 측정하여 한국전력공사의 전기공급규정에 준하여 고조파가 기기에 미치는 영향을 분석하고 변압기, 정류기, 케이블 등의 고조파에 대한 용량 검토를 통하여 고조파 방지대책을 제안하였다.

직류전철의 전력공급원인 실리콘정류기에서 발생하는 고조파 분석을 위하여 고압배전반용 TR이 있는 1개변전소를 대상으로 컴퓨터 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션을 실시한 결과, 고조파 전류의 총합왜형률이 고조파 발생원인 실리콘 정류기보다도 정류기용 TR 1차측 그리고 수전점 순으로 총합 왜형률이 작아짐으로서 각 정류기에서 발생하는 고조파가 전원측 및 고배측으로 유출되고 있음을 알 수 있었다. 또한 정류기가 100% 부하일 때가 50% 또는 30% 부하보다도 전압 및 전류의 왜형이 커지므로 전철의 실 계통에서도 전철부하가 많은 아침, 저녁의 출퇴근 시간에 전압 및 전류에 대한 파형이 많이 왜곡될 것으로 분석되었다.

고조파 억제 대책으로서로는 12펄스 방식을 사용하고 있는 독립분S/S의 측정결과 및 6펄스방식의 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 6펄스 방식의 변전소에는, 제5차 및 제7차 고조파를 상당량 억제 할 수 있는 12펄스방식 변환장치로 운용 또는 교체하는 것이 효과적이다. 금후의 정류기 증설이나 교체 시에 있어서는 이 방법에 의해 고조파억제 대책을 경제적, 합리적으로 추진해 나가야 한다.

지하철의 정류기용 부하는 변화량이 심하여 수동필터보다는 능동필터를 설치하여야 효과를 볼 수 있지만, 능동 필터 설치시 한 변전소당 약 6억원의 예산이 소요되는 것으로 분석되었다. 투자비 및 설치면적 등을 감안하면 12펄스 방식의 변압기를 설치하는 것이 바람직하며, 12펄스 방식의 변압기로 교체시 변전소내의 병렬변압기 및 정류기를 동시에 교체하여야 하며 병렬급전하는 다른 변전소에는 6펄스방식의 변압기 사용이 가능하다.

참 고 문 헌

[1] “배전계통 고조파 장애 방지대책”, 電氣協同研究會, 第 37卷, 第 3號, pp. 1-184, 1981.

[2] 송진호, “수전설비의 고조파 진단과 대책에 관한 연구”, 공학 석사학위논문, 인하대학교 산업기술대학원, 1996. 11.

[3] “전력케이블의 허용전류”, 일본전선공업규격(JCS-168-C), 1973.

[4] 유상봉, “전기설비에서의 고조파 대책 기술”, 조명전기설비학회지, 특집:전기설비의 EMI/EMC 13권, 4호, pp.40-52, 1999.

[5] “국내 고조파 관리 기준”, 한국전력 전기공급규정, 1999.

[6] “고주파 억제 대책 기술 지침”, JPEG9702, 일본통산성, 1997.

[7] “고조파 발생원에서의 대책”, 月刊電機 通卷 第 86 號, pp. 31-39, 1995.

[8] T. Karaoka, K. Mizumachi, and S. Miyari, “A pulse width controlled AC to DC converter to improve power factor and wavëform of AC line current”, IEEE Tran. IA-15, pp. 670-675, 1979.

[9] D. Maischak, “A novel control strategy for IGBT-Four-Quadrant converter”, pp. 3179-3183, EPE'97.

[10] “구미제국의 고조파 억제대책의 상황”, 月刊電機 通卷 第 95 號, pp. 46-50, 1996.

[11] Giuseppe S. Buja, “Optimum Output Waveforms in PWM Inverters,” IEEE Trans. on IA, vol. IA-16, no. 6, pp. 830-836, 1980.

저 자 소 개

송진호(宋晋鎬)

전기학회 논문지 제 49D권 5호 참조

황유모(黃有模)

전기학회 논문지 제 49D권 5호 참조