

고주파 유도가열장치와 전력품질

강창섭**
대영전력 대표

Power Quality of Induction Heating Device

Chang Seop Kang

ABSTRACT

1. 서론

우리나라에서 사용되고 있는 산업용 에너지는 산업용 공급전력의 60%에 근접할 만큼 대량의 전력을 차지하고 있다. 이것은 가열장치의 종류에 따라 그 효율이 약 15%에서 80%까지 크게 차이가 있으므로 낭비되고 있는 에너지도 그만큼 크다고 할 수 있다.

따라서, 에너지 절약의 지표는 바로 효율이 높은 가열장치의 개발, 보급에 있다고 할 수 있다.

최근에는 에너지절약 뿐만 아니라 환경오염 규제 때문에도 화석연료를 사용하는 장치는 점차 줄어들어 부득이한 경우 또는 특별한 경우에만 사용되고 있으며, 효율이 우수하고, 자동화, 생산성 향상, 품질 고급화 등으로 고주파 유도가열장치의 수요가 크게 증가되고 있는 경향이다. 모든 유도가열(induction heating)의 기본인 전자계 유도는 1830년대 Faraday에 의해 밝혀지고, 이 이론은 지난 160년간 전동기, 변압기 등에 응용되어왔다.

이 이론은 1차 회로에 교번전류가 흐르면 2차 회로에 자속이 쇄교하여 전류가 흐른다는 것으로 이 이론을 바탕으로 근접한 도체에 흐르는 유도전류에 의하여 가열하는 것을 고주파 유도 가열이라고 한다.

일반적으로 유도가열은 금속물질을 가열하는데 이용되며, 유도 가열시 사용되는 전원의 주파수는 60Hz에서 1MHz 정도 주파수의 전원이 이용된다. 고주파 가열장치의 전력범위는 수백 watts에서 수 Mega watts로 그 범위가 용도에 따라 대단히 광범위하며 그에 따른 에너지 변환기술, 응용기술도 다양하다. 고주파 가열전원장치는 고도의 power switching 기술이 필요하다.

이러한 power switching이 이루어지는 시점에서 발생하는 고조파, Noise, Notching 등은 전력품질을 떨어뜨리고, 그 결과 전력계통에서 각종 사고 및 오동작등 장애요인을 제공한다.

그림 1과 같이 원주상의 금속의 범위에 감겨져 있는 유도(감응)코일에 교류전류가 흐르면 전자 자기 유도 작용에 의해 피가열재 내에 전류가 발생한다.

이 전류는 다음식 처럼 내부로 들어감에 따라 지수 함수적으로 감소한다. $I_r = I_0 \beta \gamma / \Delta$ (1)

여기에서,

I_0 : 원주 표면부터 전류 (A)

I_r : 원주 표면부터 r (cm)의 점에서의 전류 (A)

γ : 원주 표면에서부터의 거리 (cm)

ϵ : 자연 대수의 한계

Δ : 전류의 침투 깊이 (cm)

침투 깊이 Δ 는 전류치가 표면에서의 최대치의 $1/\epsilon$ 이 되는 위치로 다음식으로 나타낸다.

$$\Delta = (\sqrt{1.03/2\pi}) \cdot (\sqrt{p/f\mu})$$
 (2)

여기에서

p : 피 가열 재의 고유 저항 ($\mu\Omega \cdot cm$)

μ : 피 가열 재의 磁氣 투자율

f : 주파수 (Hz)

이와 같이 전류가 표면 부위에 집중하는 현상 (skin effect)에 의해 발생한 유기전류와 피가열재의 고유 저항에서 발생하는 joule 열에 의해 피가열재의 표면 근처가 발열한다. .

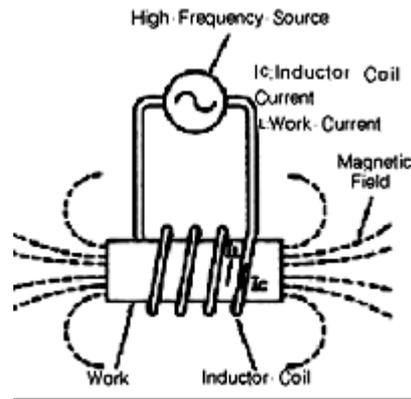


그림1·유도가열의원리

2. 본론

2.1 유도가열장치의 원리

2.2 시스템 구성

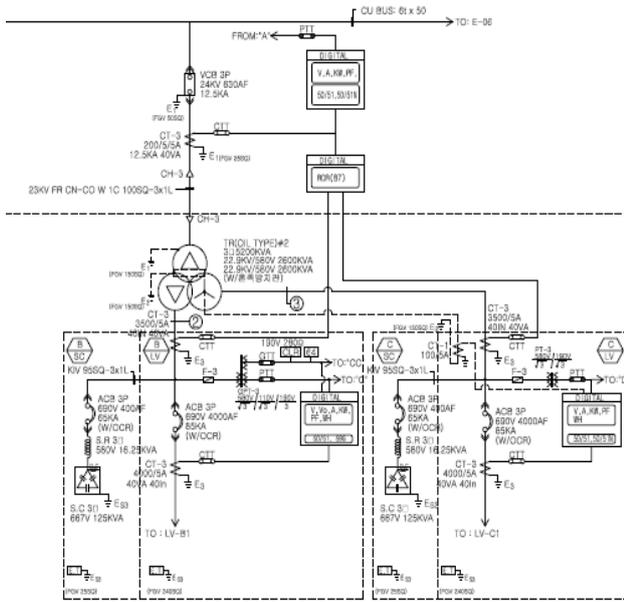


그림2. 유도 가열장치 전원공급 계통도

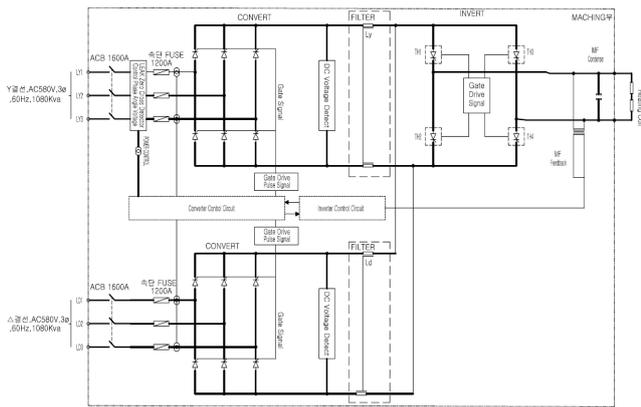


그림3 유도 가열장치 주 회로도

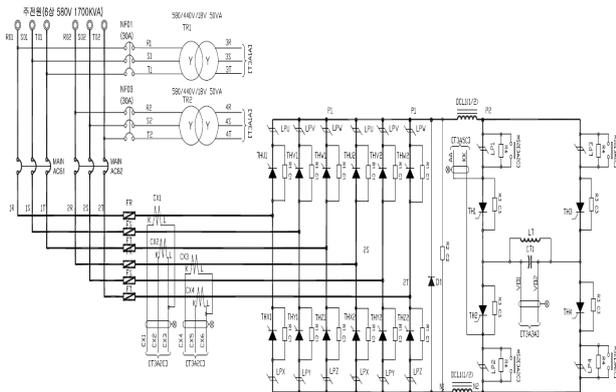


그림4 유도 가열장치 세부 회로도

유도가열장치에 공급하는 전원은 전력회사로부터 수전 (154kV or 229kV)하여 3권선 변압기(Δ Δ Y)를 통하여 부하 측에 적합한 전압으로 변압하여 공급한다.<그림1> 3권선 변압기의 1차 측에서 부하측을 보면 12pulse의 구조로 구성된다.

1차 권선의 12pulse는 2차, 3차 권선의 6pulse에서 발생하는 5th, 7th 고조파를 제거, 파형개선, 및 역률을 개선한다. 이것은 무효전력을 제거하고 변압기 효율을 향상시킨다.

2.3 고주파 유도 가열 장치의 전력 품질

2.2.1 EMC/EMI

고주파 가열에 쓰이는 주파수는 이를 그대로 고주파의 전력을 사용하므로 무선통신, 무선표식, 방송 등에 유도장해에 문제점을 야기하는데, 일본의 전파법이나 미국의 FCC 등에 의해 엄격히 규제되고 있다. 이들 장치 부근에서는 강력한 전자파가 있으므로 가까이 설치되어 있는 전자기기는 방해를 많이 받는다.

2.2.2 Harmonics

고주파 유도 가열 장치는 전원전압을 공급받아서 AC→DC로 변환하는 Converter 부와 DC→AC로 변환하는 Inverter 부로 구성되어 있으며, Converter에서는 정류작용에 의하여 고조파 전류를 발생하고, 계통 임피던스와 고조파 전류가 결합하여 고조파 전압이 발생된다. DC→AC로 변환하는 Inverter에서는 스위칭소자에서의 $\frac{dv}{dt}$, $\frac{di}{dt}$ 작용에 의하여 Noise가 발생된다.

2.2.3 Converter 전원측 측정자료

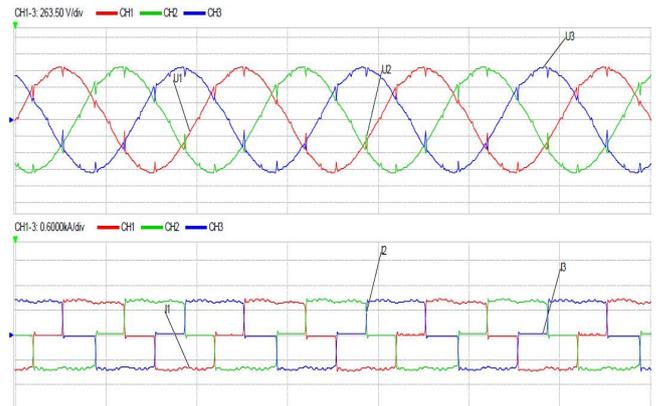


그림5 Converter 전원측 전압/전류파형

POWER		VOLTAGE		CURRENT	
Freq	59.977 Hz				
P1	0.1771MW	U1	0.5790kV	I1	0.6645kA
P2	0.1772MW	U2	0.5817kV	I2	0.6728kA
P3	0.1722MW	U3	0.5780kV	I3	0.6549kA
Psum	0.5265MW	THD-U1	4.26 %	THD-I1	29.72 %
S1	0.2215MVA	THD-U2	4.32 %	THD-I2	28.79 %
S2	0.2257MVA	THD-U3	4.35 %	THD-I3	30.71 %
S3	0.2194MVA	Upk+1	0.8402kV	Ipk+1	0.8804kA
Ssum	0.6666MVA	Upk+2	0.8414kV	Ipk+2	0.8946kA
Q1	0.1330Mvar	Upk+3	0.8377kV	Ipk+3	0.8828kA
Q2	0.1399Mvar	Upk-1	-0.8393kV	Ipk-1	-0.8830kA
Q3	0.1360Mvar	Upk-2	-0.8414kV	Ipk-2	-0.8748kA
Qsum	0.4088Mvar	Upk-3	-0.8372kV	Ipk-3	-0.8774kA
DPF1	0.4540	Uavg	0.5796kV	KF1	13.51
DPF2	0.4325	Uunb	0.40 %	KF2	12.80
DPF3	0.4361			KF3	13.58
DPFsum	0.8304	Iavg	0.6641kA		
		Iunb	1.85 %		

그림6 Converter 전원측 전력측정

Order	[V]	Order	[V]	Order	[V]	Order	[V]
1	578.02	17	3.35	33	1.25	49	5.44
2	4.23	18	0.69	34	3.32	50	3.31
3	1.09	19	3.76	35	4.48	THD	4.26 (%)
4	5.56	20	0.86	36	2.75		
5	0.57	21	0.56	37	6.50		
6	0.92	22	3.07	38	2.43		
7	8.42	23	5.12	39	2.72		
8	5.34	24	2.14	40	3.39		
9	0.41	25	6.94	41	2.61		
10	5.37	26	1.60	42	1.31		
11	3.40	27	1.90	43	3.78		
12	0.89	28	3.75	44	1.83		
13	4.96	29	2.66	45	2.00		
14	2.45	30	1.16	46	3.43		
15	0.88	31	3.76	47	3.72		
16	3.54	32	1.09	48	2.84		

Order	[A]	Order	[A]	Order	[A]	Order	[A]
1	0.6359k	17	0.0325k	33	0.0047k	49	0.0079k
2	0.0129k	18	0.0112k	34	0.0064k	50	0.0063k
3	0.0063k	19	0.0301k	35	0.0118k	THD	29.72 (%)
4	0.0083k	20	0.0086k	36	0.0095k		
5	0.1339k	21	0.0036k	37	0.0129k		
6	0.0117k	22	0.0076k	38	0.0074k		
7	0.0817k	23	0.0221k	39	0.0048k		
8	0.0092k	24	0.0107k	40	0.0058k		
9	0.0032k	25	0.0220k	41	0.0089k		
10	0.0082k	26	0.0082k	42	0.0088k		
11	0.0545k	27	0.0041k	43	0.0101k		
12	0.0115k	28	0.0070k	44	0.0068k		
13	0.0447k	29	0.0159k	45	0.0051k		
14	0.0089k	30	0.0102k	46	0.0051k		
15	0.0032k	31	0.0165k	47	0.0069k		
16	0.0079k	32	0.0077k	48	0.0080k		

그림7 Converter 전원측 차수별 고조파전압/전류크기

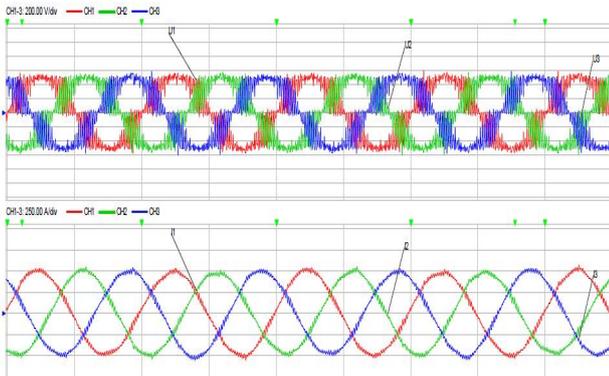


그림8 전압형 Inverter 출력측 전압/전류파형

유도가열장치에서 발생하는 전력품질에 의한 영향의 대표적인 피해는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- 고조파에 의한 과전류로 전력기기의 과열, 소손
- 전압파형 변형에 의한 제어장치의 오·부동작
- 유도장해에 의한 통신장해 등이 대표적이다.

2.4 유도가열장치의 전력품질과 대책/대책사례

표1 고조파와 노이즈의 비교

구분	Harmonics	Noise
발생원	Converter(정류작용)	Inverter(스위칭작용)
발생량	부하전류에 비례	스위칭주파수
전달경로	전도성	전도성, 유도성, 방사성 스위칭주파수
영향요소	전원임피던스	스위칭소자의 $\frac{dv}{dt}$, $\frac{di}{dt}$
대책	다상전류 AC/DC Reactor PWM Converter Harmonic Filter	Noise Filter Twist Shield Cable 스위칭주파수 조정 출력용 AC Reactor

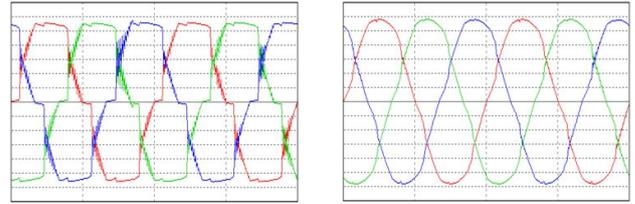


그림9 출력용 AC Reactor 설치 후 전압파형 개선

3. 결론

환경오염 규제 때문에도 화석연료를 사용하는 장치는 점차 줄어들고, 효율이 우수하고, 자동화, 생산성 향상, 품질 고급화 등으로 고주파 유도가열장치의 수요가 크게 증가되고 있는 경향이 있지만, 측정자료에서 알 수 있듯이 고조파와 같은 전력품질의 면에서는 매우 비효율적인 장치이다. 근본적으로 전력품질을 저하시키는 유도가열장치의 Converter/Inverter에서 발생하는 Harmonics와 Noise를 제거하는 신기술 개발이 필요한 시점이다. 장치측에서 발생하는 전력품질을 근본적으로 개선하고, 대책장치를 부가적으로 조합하는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고 문헌

- [1] 메탈넷코리아 기술자료집, “고주파 유도 가열장치의 개요”