

변압기의 특성과 고조파 장애 영향에 대한 고찰

김 세 동

두원공과대학 교수/공학박사, 기술사

1. 머리말

가정이나 공장에 공급되는 전원은 교류이다. 교류는 직류보다 큰 전력을 먼 거리에 훨씬 경제적으로 전송할 수 있다. 또한 교류를 사용하면 변압기를 이용하여 전압을 쉽게 변화시킬 수 있으므로 전력의 전송 효율이 높아지게 된다. 따라서, 교류전송방식에서 전력용 변압기가 널리 사용되고 있으며, 전기설비에서 전력용 변압기는 가장 중요한 기기이다.

변압기 제조기술은 크게 개발이 진행되어 왔으며, 최근 들어 환경보전, 에너지 절약형, 유지보수 용이와 화재에 대한 안전성 및 Oilless화된 변압기 개발이 필요하게 되었다.

이와 더불어 고분자 재료의 현저한 발달에 따라 전기적, 기계적으로 우수한 에폭시 수지(Epoxy Resin)가 개발되었고, 이를 변압기에 적용하여 몰드변압기가 제조되었다. 현재는 몰딩 기술의 진보에 따라 6.6kV급 뿐만 아니라 22.9kV급까지 널리 적용되어 점차 고전압 대용량화와 소형·경량의 변압기가 생산되고 있다.

또한, 제통산업(주)에서 국내 최초로 개발 및 상용화

한 아몰퍼스 변압기는 현재의 변압기 철심을 방향성 규소강판 변압기(G-9 또는 G-6) 대신 비정질 자성재료(Amorphous Metal)로 대체하여 무부하손을 현재 사용중인 일반 변압기의 1/5 수준으로 줄인 에너지 절약형 신기술 변압기가 생산되고 있다.

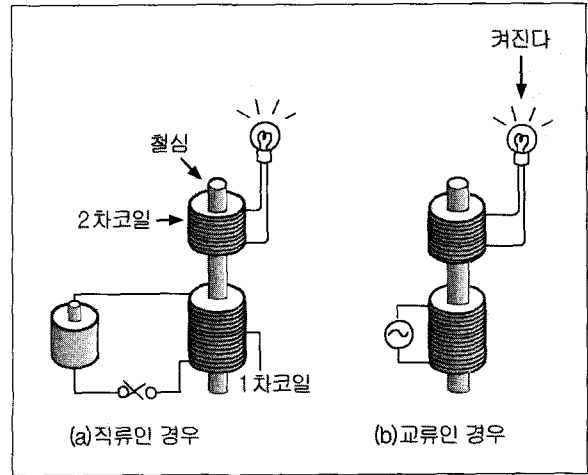
반면에 근래에 들어 첨단기술의 발전과 아울러 고조파 발생원이라고 할 수 있는 각종 사이리스터 및 반도체 응용기기, 전력전자기술 응용기기의 사용 증가로 인하여 전기수용설비 측에서 고조파에 의한 각종 사고 및 장애 요인이 크게 증가하고 있는 실정이다.

이와 같이 부하설비의 다양화 및 전력전자 기술 응용 범위의 확대로 고조파 문제가 증대되고 있으며, 표 1에서 보는 바와 같이 고조파가 미치는 영향으로 콘덴서, 직렬 리액터, 변압기, 회전기 등에서의 이상음, 과열, 소손 등의 사고가 발생하고, 지시계기, 보호계전기 등의 오차, 오동작 등이 발생하고 있는 것으로 지적된다.

본고에서는 변압기의 원리 및 종류별 특성에 대해서 설명하고, 변압기의 고조파 장애 영향 및 대책에 대해서 알아보고자 한다.

〈표 1〉 고조파가 전기기기에 미치는 영향의 분류

분 류	현 상	영향을 받는 기기
고조파에 의한 과전류 유입		콘덴서 리액터
고조파 전압의 중첩	이상음 과열 소손 오차 오동작제어	변압기 회전기 전력케이블 배선용차단기 누전차단기 전력량계 지시 계기
순시파형의 왜형	오차 제어불안정 오동작제어	인버터 지시 계기 보호계전기 조명기구 각종 위상제어기기
유도 장애	잡음 화상 일그러짐	전송장비 통신장비



〈그림 1〉 전자유도 현상

2. 변압기의 원리

가. 전자 유도 작용

변압기는 1882년에 프랑스의 고라와 영국의 집스라는 사람에게 의해서 발명되었는데, 그 원리는 패러데이의 발견한 전자유도의 법칙을 응용한 것이다. 그림 1의 (a)는 1차코일에 전지를 연결한 것이며, 스위치를 뺐다 붙였다 할 때에만 전구가 점등될 뿐, 스위치를 붙여놓은 상태에서는 불이 들어오지 않는다. 이것은 스위치의 개폐에 의해 1차 코일에서 만들어지는 자계가 변화하고 그 때문에 2차코일을 통과하는 자력선이 변화해서 2차코일에 유도기전력이 일어나기 때문이다. 그 때 2차코일에 발생하는 유도기전력의 방향은 렌츠의 법칙에 따른다.

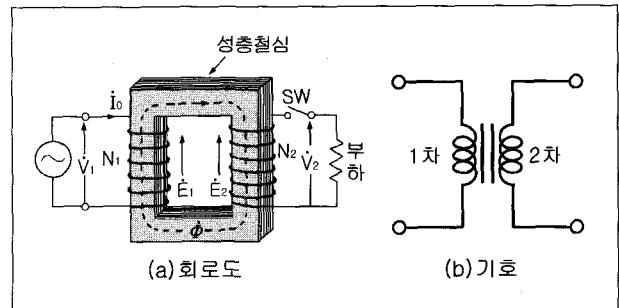
그림 1의 (b)는 1차코일에 교류전압을 가하면 스위치를 개폐하지 않아도 전구는 불이 들어온 채로 있다. 이것은 교류전압이 언제나 주기적으로 변화하기 때문이다. 이렇게 해서 1차코일에 가한 교류전압을 2차 코일에 전할 수 있다. 그 사이를 중계하는 것이 자계(자력선)이다. 실제의 변압기에서는 그림 2와 같이 얇은 규소강판을 겹쳐

쌓아 철심으로 하고 그 주위에 1차코일과 2차코일을 감는다.

이와 같이 변압기의 기본 원리는 패러데이의 전자 유도 법칙(Faraday's law of electromagnetic induction)과 렌츠의 법칙(Lenz's law)으로 설명될 수 있다. 전자 유도 법칙으로 유도 기전력이 발생하며, 렌츠의 법칙은 유도 기전력의 방향을 결정한다.

나. 동작 원리

그림 2의 (a)는 변압기의 회로를 나타낸 것으로 간단히 (b)와 같이 기호로 나타낼 수 있다. 1차 권선(Primary



〈그림 2〉 변압기의 회로 구성

Winding)과 2차 권선(Secondary Winding)은 전기적으로 분리되어 있으나 자기적으로는 결합되어 있다.

1차 권선에 교류전류를 흘리면 철심을 통과하는 자속이 변화하게 되어 전자 유도작용에 의한 유도 기전력이 2차 권선에 발생된다. 이때 유도 기전력은 자기회로를 통과하는 자속의 변화 속도와 양쪽에 감겨 있는 권수에 따라 달라진다.

1차측의 주파수를 일정하게 하면 2차측도 같은 주파수가 된다. 2차 권선수가 1차 권선수보다 적으면 2차 전압이 1차 전압보다 낮게 된다. 반대로 2차 권선수가 많으면 1차 전압보다 2차 전압이 커진다. 전자를 강압기(Step-down Transformer)라 부르고 후자를 승압기(Step-up Transformer)라 한다.

2차 권선에 흐르는 전류의 양은 연결된 부하에 따라 달라지며, 2차 전류에 의해 1차 전류가 달라진다. 변압기는 1차 권선에 공급된 전력을 최소의 손실로 2차 권선에 전달하는 전기기기이다. 강압기인 경우 전압은 1차측이, 전류는 2차측이 크다 ($P = V_1 I_1 = V_2 I_2$).

전압, 전류, 권수 사이의 관계를 나타낸 것이 식 (1)이고, 이 식을 권수비(Turn Ratio) 또는 변압비(Transformer Ratio)라 부른다.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \text{----- (1)}$$

여기서 V_1 : 1차 전압[V], V_2 : 2차 전압[V],
 N_1 : 1차 권선수[회], N_2 : 2차 권선수[회],
 I_1 : 1차 전류[A], I_2 : 2차 전류[A]를 나타낸다.

다. 자심의 종류와 특성

코일 속을 텅빈 공간으로 두기보다는 무엇인가 철과 같은 것을 넣으면 자속이 증가하여 인덕턴스가 커지게 된다. 그래서 대부분의 코일은 자심을 중공(中空)으로 하지 않고 다음과 같은 것을 코일속에 넣어서 자속 밀도가 높아지도록 하고 있다.

(1) 규소 강판

철에 5% 이내의 규소(Si : 실리콘)를 혼합한 자심 재료이며, 전원 변압기나 변성기 등의 저주파용 코일에 사용된다. 두께 0.35mm 정도의 판으로 절연한 것을 포개어 사용한다. 자기적 성질이 좋고 맴들이 전류도 적으며 우수한 자심 재료로 사용된다.

(2) 퍼멀로이(Pemalloy)

철과 니켈의 합금으로서 투자율이 크고 우수한 자심 재료이지만 조금 가격이 비싼게 단점이다.

(3) 압분자심(壓分磁心)

고주파 회로에서는 판 모양의 철심이면 맴들이 전류 손실이 커지므로, 이것을 작게 하기 위해서 합금을 가루모양으로 만들어 표면을 절연하고, 결합재료로 고정시킨 압분자심이 사용된다.

(4) 페라이트(Ferrite)

망간아연이나 니켈아연의 산화물을 가루로 한 다음 구워서 굳힌 것이다. 도체가 아니므로 금속 철심과 같은 맴들이 전류손실을 일으키지 않는다. 고주파 회로용의 코일 자심으로 우수하다. 이와 같이 자로(磁路)로서 우수한 것이 자심으로 사용된다.

(5) 비정질 자성 재료(Amorphous Metal)

철(Fe), 붕소(B), 규소(Si) 등의 혼합물을 용융(鎔融) 후 급속 냉각시켜 불규칙한 원자 배열을 갖도록 한 얇은 박판으로 소재의 특성상 투자율이 높고 보자력이 작다. 그리고 불규칙한 비정질 구조에 의해 자속의 변화에 따른 원자 회전은 용이하기 때문에 히스테리시스손을 획기적으로 줄일 수 있다. 또한 현재 사용중인 규소강판의 1/10 두께로 얇고 전기저항이 크기 때문에 맴들이 전류 손실도 적다. 이로 인해 규소강판 철심에 비해 손실이 전체적으로 1/5 정도이다. 표 2는 비정질 자성재료와 전기

〈표 2〉 철심 소재로서의 특성 비교

구 분	특 성	비정질 자성재료 (amorphous metal)	전기강판 (방향성 규소강판, G9급)	비 고
전자기적 성질	<ul style="list-style-type: none"> • 철심 손실(W/kg) • 여자특성(VA/kg) • 포화자화, Tesla(25°C) • 고유 저항(Ω-m) 	0.23 0.37 1.55 130	1.72 5.2 1.86 45	아몰퍼스메탈 : 1.36 Tesla, 규소강판 : 1.74 Tesla
물리적 성질	<ul style="list-style-type: none"> • 두께(μm) • 비중(g/cc) • 경도(Hv) 	20~30 7.19 900	250~300 7.65 210	
열처리 성질	<ul style="list-style-type: none"> • 온도(°C) • 시간(h) • 인가장세기 	400 5~6 5~10	780~820 2 -	규소강판은 고온열처리, 아몰퍼스 메탈은 저온중에 자장열처리

강판의 특성을 비교한 것이다.

라. 무부하손의 발생 원리

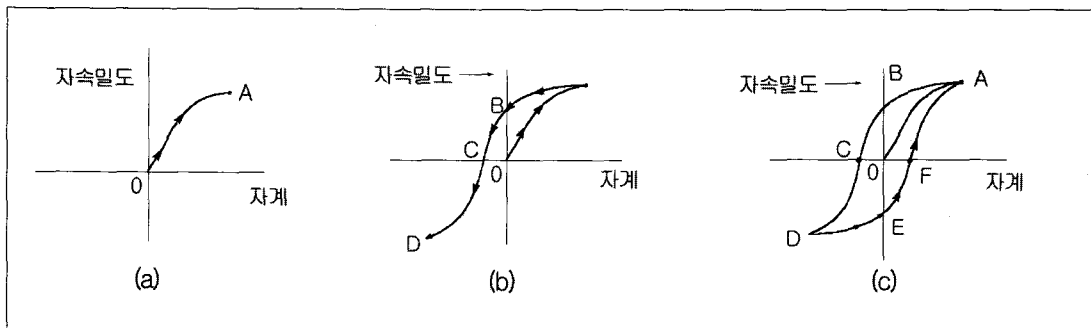
1차측에서 2차측으로 에너지를 100% 옮기는 것은 불가능한 일이다. 그러나 현재 많은 에너지를 옮기는 기술이 발달되어 있다. 일반적으로 변압기의 손실은 권선에서 발생하는 부하손과 철심에서 발생하는 무부하손으로 대별된다. 부하손은 도체의 저항(R)과 부하 전류(I)에 따라 다르게 발생되고($P_c = I^2 R$), 무부하손은 부하 사용의 대소에 관계없이 변압기에 전원을 인가할 때부터 정격 용량의 100%를 사용하여도 동일한 손실을 발생한다. 무부하손은 철심이 자화되면서 발생하는 손실로 크게 히스테리시스손과 와전류손으로 구분된다.

(1) 히스테리시스 손실

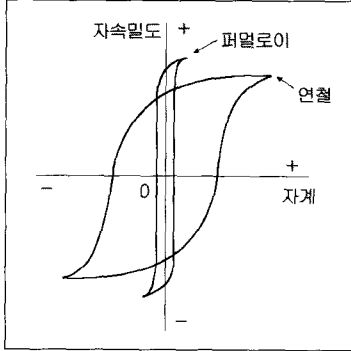
코일에 전류가 흐르면 자계가 생긴다. 전류를 끊게 하고 자계를 크게 하면, 자속 밀도도 점점 커진다. 이 모양을 나타낸 것이 그림 3의 (a)이다. 어떤 크기가 되면 포화하여 A점 이상 증가하지 않게 된다.

이 점으로부터 전류를 줄이고, 자계를 작게 하면 자속 밀도도 작아지지만 그림 3의 (b)와 같이 자계가 0이 되어도 B점에서 자속밀도는 많이 남는다. 전류의 방향을 반대로 하여 크게 하면 C점에서 자속밀도는 0이 된다. 또한 D점까지 가면 반대 방향의 포화점이 된다.

여기서부터 전류를 줄여 나가면 자계 0에서 자속밀도는 E점이다. 또 처음과 같은 방향으로 전류가 흐르기 시작하면 F점을 통과해서 A점의 포화점에 도달한다.



〈그림 3〉 히스테리시스 곡선

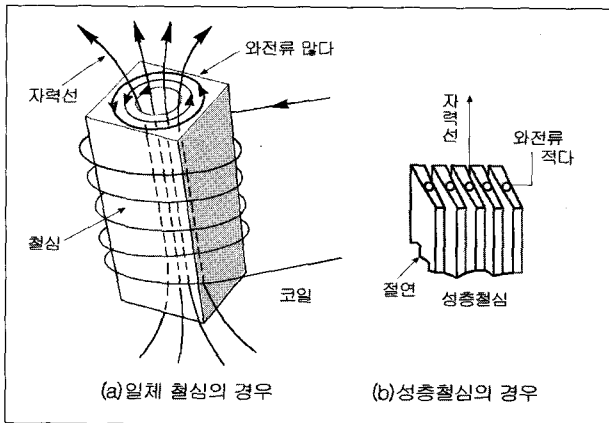


〈그림 4〉 연철과 퍼멀로이의 히스테리시스 비교

이와 같이 자계의 변화와 자속밀도 변화와의 사이에 어긋남이 생기는 것을 히스테리시스(Hysteresis)라고 한다. 이 어긋남 때문에 여분의 에너지가 소비되게 된다. 좋은 자심재료는 이 어긋남이 작으므로 손실이 적어진다. 그림 4는 연철과 퍼멀로이와의 히스테리시스의 비교이다. 자속밀도의 나머지 부분은 거의 같지만, 0으로 하기 위한 반대 방향의 자계는 퍼멀로이쪽이 훨씬 적어도 된다.

(2) 와전류(맴돌이전류) 손실

철심 속을 교류자속이 통과하면 자속의 변화에 의해서 기전력이 생겨서 전류가 흐른다. 전류는 저항이 가장 작아 지도록 원처럼 흐르기 때문에 그림 5와 같이 맴돌이가 된



〈그림 5〉 와전류손실

다. 다시 말해서 와전류손이란 자력선의 변화에 의해 철심 내부에 생기는 소용돌이 모양의 유도전류에 의한 것이다.

이 맴돌이 전류는 철심의 저항에 의해서 열로 되어 버리는데, 변압기의 철심은 이 맴돌이 전류를 작게 하기 위해서 얇은 규소강판을 절연해서 겹쳐 쌓는 모양을 하고 있다. 또 페라이트와 같이 재료를 산화시켜서 전류가 흐르기 어렵도록 하고, 맴돌이 전류의 발생을 억제하고 있는 것도 있다.

이와 같은 무부하 손실은 변압기에 연결되어 있는 전기 기기가 가동되지 않는 사이에도 소비되는 것이기 때문에 대기전력에 해당한다.

3. 변압기의 특성 비교

변압기는 구조상의 분류에 의하면, 상수·내부 구조·권선의 수·절연의 종류·냉각 매체·냉각 방식·탭전환 방식·오일열화 방지 방식 등으로 분류하고 있다. 그리고 변압기의 최고 전압에 따라 초고압 변압기, 특고압 변압기라 한다. 용량에 따라서는 대용량 변압기, 중용량 변압기로 부르고 있지만 그 범위는 통일되어 있지 않다.

최근에 전력설비의 고효율기로서 배전용 주상변압기의 채용이 진행되는 등, 아몰퍼스 변압기의 보급이 증가되고 있다. 참고로 표 3은 일반변압기와 아몰퍼스 변압기의 특성을 비교한 것이며, 아몰퍼스 변압기의 장단점을 들면 다음과 같다.

○아몰퍼스 변압기의 장점

- ① 비정질 구조 및 초박판 철심 소재에 의한 무부하손실의 절감
- ② 손실 절감에 의한 변압기의 운전보수비 절감 및 변압기의 수명 연장 기대
- ③ 전력절감 효과로 화력발전소 증설이 억제되어 환경오염 방지에 기여
- ④ 전력손실 절감액 증가 예상

⑤ 고조파 대역에서 우수한 자기적 특성에 의한 고효율 및 컴팩트화

○아몰퍼스 변압기의 단점

① 아몰퍼스 메탈 소재의 높은 경도 및 나쁜 취성으로 인한 제작상의 어려움

② 낮은 자속밀도 및 점적률에 의한 원가 상승

〈표 3〉 각종 변압기의 특성 비교

구 분	유 입 변 압 기		
	일반 유입 변압기	아몰퍼스 유입 변압기	
권선 절연물	A종(105℃) 크라프트지, PressBoard	E종(120℃) IKP(다이아몬드 패튼지)	
온도 상승	유온	50℃	60℃
	권선온도	55℃	65℃
절연특성	안정	안정	
사용장소	옥내, 옥외	옥내, 옥외	
철심재질	규소강판 (G-10)	아몰퍼스 메탈	
무부하손실(Watt) (500kVA 기준)	1,800	270	
전력손실	보통(8,700)	작다(7,170)	
전기요금(60% 부하율)	100	64	
상대적인 가격(%)	60	85	
소 음	작다	작다	
충격내전압 (24KV급)	150kV	150kV	
단락강도	보통	보통	
크기(500kVA 기준) 가로×세로×높이	1,450×1,100×1,640	1,450×1,100×1,640	
중량(500kVA 기준)	2,050kg	2,050kg	
고조파 부하(5% 함유시)	온도상승 크다(23%)	온도상승 적다 (6%)	
과부하 내량	보통	크다	
장 점	<ul style="list-style-type: none"> 일반적으로 널리 사용되어 왔으며 가격이 저렴함. 소음이 적으며 충격내전압이 높아 차단기 2차측에 별도의 SA를 시설하지 않아도 됨. 옥내, 옥외 등 설치장소에 구애받지 않는다. 	<ul style="list-style-type: none"> 일반 유입변압기의 장점을 그대로 갖고 있다. 신소재인 아몰퍼스 코어 사용으로 무부하손실을 기존유입의 1/5 수준으로 낮추어 전력손실이 작다. E종 절연물 채용으로 절연물의 열화에 의한 변압기 사고 방지 변압기의 발열량이 적어 설치면적이 작다. 철심의 발열량이 적어 권선 및 절연물들의 경년변화를 줄일 수 있어 제품 수명이 길다. 철심의 발열에 의한 권선의 온도상승을 최소화하여 과부하내량이 커짐. 	
단 점	<ul style="list-style-type: none"> 절연유의 발화온도가 낮고 연소성임(대용량변압기 안전장치 필요). 절연물의 내열온도가 A종(105℃)로 과부하 사용시 열화되기 쉬움. 옥내에 설치할 경우 오일의 유출 등을 고려한 시설이 요구됨. 	<ul style="list-style-type: none"> 옥내에 설치할 경우 오일의 유출 등을 고려한 시설이 요구됨. 	
사용실적	<ul style="list-style-type: none"> 일반적으로 옥외용으로 널리 사용됨. 	<ul style="list-style-type: none"> 아몰퍼스 주상변압기는 '97년부터 연간 5,000대 이상 사용 중이며, 전력용변압기는 국내·외에서 사용 확대중임. 	

기술정보

구 분		볼 드 변 압 기	
		일 반 볼 드 변 압 기	아 몰 퍼 스 볼 드 변 압 기
권선 절연물		B종(130℃) Epoxy Resin	B종(130℃) Epoxy Resin
온도 상승	유온	-	-
	권선온도	80℃	80℃
절연특성		안정	안정
사용장소		옥내	옥내
철심재질		규소강판 (G-11)	아몰퍼스 메탈
무부하손실(Watt) (500kVA 기준)		2,080	430
전력손실		보통(8640)	작다(6,990)
전기요금(60% 부하율)		100	63
상대적인 가격(%)		100	145
소 음		보통	보통
충격내전압(24kV급)		95kV	125kV
단락강도		강하다	강하다
크기(500kVA 기준) 가로×세로×높이		1,500×850×1,600	1,160×850×1,600
중 량(500kVA 기준)		1,750kg	1,680kg
고조파 부하(5% 함유시)		온도상승 크다(23%)	온도상승 적다(6%)
과부하 내량		크다	매우 크다
장 점		<ul style="list-style-type: none"> • 권선의 물딩처리로 우수한 기계적 단락 안정성 • 편리한 유지 보수 • 절연특성이 우수하여 안정성이 있다. • 난연성, 내습성 등으로 옥내용으로 적합 	<ul style="list-style-type: none"> • 일반볼드변압기의 장점을 그대로 갖고 있다. • 신소재인 아몰퍼스 코어 사용으로 무부하손실을 기존볼드의 1/5수준으로 낮추어 전력손실이 가장 작다. • 특수한 권선 구조로 외형 치수 작아짐. • 변압기의 발열량이 적어 설치면적이 가장 작다. • 철심의 발열량이 적어 권선 및 절연물들의 경년변화를 줄일 수 있어 제품 수명이 가장 길다. • 철심의 발열에 의한 권선의 온도상승을 최소화하여 과부하내량이 커짐.
단 점		<ul style="list-style-type: none"> • 유입변압기보다는 소음이 큼. • 충격내전압이 낮아 차단기 2차측에 SA를 설치하여야 함 • 동일 용량일 경우 유입변압기에 비해 무부하 손실이 커짐. • 고전압 인가 부분이 노출되어 절연거리 확보 필요(외함 필요) 	<ul style="list-style-type: none"> • 유입변압기보다는 소음이 큼. • 가격이 고가이다. • 고전압 인가 부분이 노출되어 절연거리 확보 필요(외함 필요)
사용실적		• 자가용설비의 옥내설치용으로 널리 사용되고 있음.	• 2000년 11월 공인기관 인정시험 합격 • 국내 사용실적은 없으나, 국외에서 사용 확대중

또한 아몰퍼스 변압기의 특징으로서 고조파에 강한 점을 들 수 있다. 일반적으로 고조파의 영향에 의해 변압기에 흐르는 전류의 대부분이 복잡하게 변형된 파형을 갖는 경우가 지적되고 있다. 이 복잡한 파형의 전류가 변압기에 흐를 경우 규소동 변압기에 비해 아몰퍼스 변압기는 무부

하손이 적기 때문에 주파수에 대한 영향이 적은 것으로 지적된다. 일본의 고조파 가이드라인에서 허용되고 있는 고조파 환경 목표 레벨은 6.6kV 배전계통의 5%의 고조파로 규소동 변압기의 무부하 손실이 1.23배인데 비하여 아몰퍼스 변압기는 약 1.06배 정도인 것으로 보고되고 있다.

4. 고조파가 변압기에 미치는 영향

고조파가 변압기에 미치는 영향은 다음과 같이 분류할 수 있다.

- ① 고조파 전류 증첩에 의한 동손, 철손 증가
- ② 철심의 자화 현상으로 인한 이상음 발생
- ③ 변압기 권선과 선로 정전용량 사이의 공진 현상
- ④ 절연 열화

가. 손실의 증가

(1) 동손

동손은 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$P_c = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} R_n I_n^2 [W] \text{-----} (2)$$

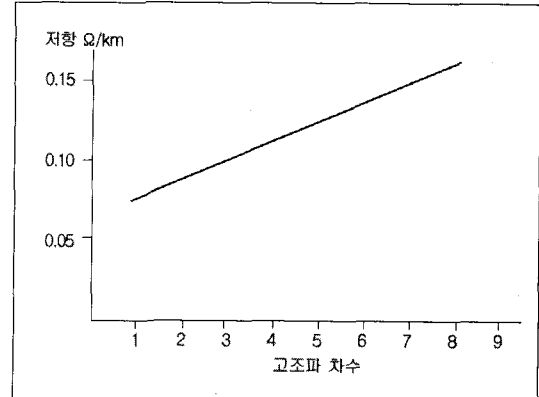
여기서, I_n : n차 고조파전류의 피크치(n=1, 기본파)

R_n : n차 고조파에서 설비의 저항

설비의 저항이 상수(주파수와 독립)인 경우에 동손은 식 (3)과 같다.

$$P_{ca} = \frac{1}{2} R \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 = \frac{1}{2} R I_1^2 (1 + (CDF)^2) [W] \text{--}(3)$$

여기서, CDF(current distortion factor)는 전류 왜



〈그림 6〉 동도체 저항과 주파수·전류관계

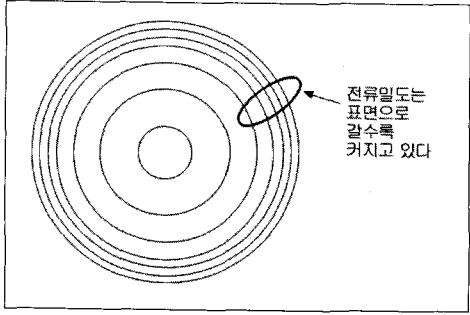
형률을 나타내며, 식 (4)와 같이 표현한다.

$$CDF = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \text{-----} (4)$$

따라서, 고조파 발생에 의해서 동손이 증가하는 것을 결정하는 요인은 전류 왜형률이다. 보통 전기설비의 저항은 주파수에 비례하여 증가한다. 그림 6은 주파수와 구리 도체와의 관계를 나타낸 것이며, 제7고조파에서의 저항은 기본파에서의 저항과 비교하여 2배 이상이 되는 것으로 나타났다. 이러한 변화는 도체 내부의 표피효과 때문이다. 고조파 손실에서의 표피효과의 영향은 큰 도체에서는

♣ 알아보기

● 표피효과 ●



전선에 교류가 흐를 경우에는 전선 내의 전류밀도의 분포는 균일하지 않고 중심부는 작고 주변부에 가까워질수록 전류밀도가 커지고 있다.

이것은 전선의 중앙부를 흐르는 전류는 전류가 만드는 전자속과 쇄교하므로 전선 단면내의 중심부일수록 자력선 쇄교수가 커져서 인덕턴스가 커지기 때문이다. 그 결과 그림 7과 같이 전선의 중심부일수록 리액턴스가 커져서 전류가 흐르기 어렵고, 전선 표면으로 갈수록 전류가 많이 흐르게 되는 경향을 지니게 된다. 이것을 표피효과라 한다.

표피효과는 주파수가 높을수록, 전선의 단면적이 클수록, 도전율이 클수록 그리고 비투자율이 클수록 커진다.

〈그림 7〉 표피 효과의 개념도

중요한 문제이다.

식 (5)는 동손의 증가율(ϵ_c)을 나타낸 것이며, P_c 는 고조파 유입시의 동손이며, P_{cl} 은 기본파전류 I_1 에서의 동손을 나타낸다.

$$\epsilon_c = \frac{P_c}{P_{cl}} \times 100 [\%] \text{ ----- (5)}$$

여기서, $P_{cl} = I_1^2 R \times (1 + \beta) [W]$

$$P_c = P_{cl} + I_1^2 R \cdot \sum_{n=2}^{\infty} a_n^2 (1 + \beta \cdot n^m) [W]$$

R : 권선의 직렬 저항

β : 기본파에 있어서의 표류손실계수

n : 고조파 차수

a_n : $I_n/I_1 = n$ 차조파 함유율

m : 계수 ($m=1.6 \sim 2.0$ 정도)

이와 관련하여 제5조파가 10% 포함되어 있을 때 $a=0.1$, $\beta=0.25$, $m=1.8$ 이라고 하면, 동손의 증가율은 다음과 같다.

$$P_{cl} = 1.25 I_1^2 R [W]$$

$$P_c = 1.31 I_1^2 R [W]$$

따라서, $\epsilon_c = \frac{1.31}{1.25} \times 100 = 104.8[\%]$ 로서 동손이 약 5[%] 증가한다.

(2) 철 손

철손은 히스테리시스손과 와류손으로 분류하며, 히스테리시스손은 자성재료와 전류의 주파수에 따라 달라진다. 주어진 자심에 대해 히스테리시스 손실은 식 (6)과 같다.

$$P_h = a_h \cdot f \cdot B_m^V [W] \text{ ----- (6)}$$

여기서, a_h : 철심의 차원에 의존하는 상수

f : 전류의 주파수

B_m : 자속밀도의 최대치

V : 철심재료에 따라 달라짐(예를 들면, 재료는 $V=1.5, 2.5$)

와류손은 철심재료에 따라 다르며, 특히 전류의 주파수 및 자속밀도, 철심 두께에 따라 다르고 식 (7)과 같다.

$$P_e = a_e \cdot f^2 \cdot B_m^2 [W] \text{ ----- (7)}$$

여기서, a_e : 철심의 차원에 의존하는 상수

f : 전류의 주파수

B_m : 자속밀도의 최대치

따라서, 총 철손은 식 (8)과 같다.

$$P_s = a_h \cdot f \cdot B_m^V + a_e \cdot f^2 \cdot B_m^2 [W] \text{ ----- (8)}$$

총 철손은 주파수와 최대 자속밀도의 비선형함수라고 할 수 있다. 주어진 전압 고조파에 대해 주파수를 알고 있다면 최대자속밀도는 고조파 전류에 비례한다. 비례항의 상수는 코일과 자속 철심의 설계에 따라 다르다.

이러한 손실의 증가로 인하여 변압기류 및 권선의 온도 상승을 초래한다. 더욱이 손실의 대부분은 동손이다.

나. 철심의 자화 현상

변압기는 고조파 전류에 따른 철심의 자속으로 인하여 철심에 자화 현상이 일어나며, 그 손실 P 는 식 (9)와 같다.

$$P = K_2 n f \left(\frac{dL}{L} \right) [W] \text{ ----- (9)}$$

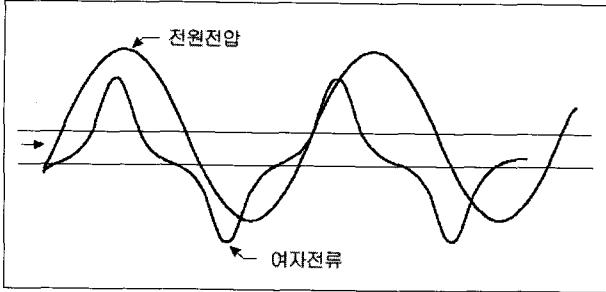
여기서, K_2 : 정수, f : 기본주파수, n : 고조파 차수이며, 주파수가 높으면 손실이 커진다.

따라서, 고조파가 변압기에 유입되면 소음이 발생하며, 때로는 금속적인 소리나 이상음을 만들기도 한다. 또한 소음의 크기도 평소보다 10~20[dB] 정도 높아지는 일이 있다.

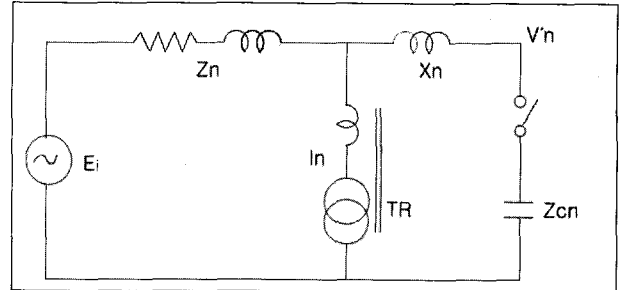
다. 무부하시 변압기 권선과 선로 정전용량 사이의 공진 현상

(1) 변압기 포화특성에 의한 고조파

변압기 철심의 자화 특성은 직선성이 아니며, 또한 히스테리시스 현상으로 인하여 변압기에 정현파 교류전압



〈그림 8〉 변압기의 대표적인 여자전류 파형



〈그림 9〉 변압기 등가회로

〈표 4〉 여자전류의 고조파 크기

고 조 파	열간 압연규소강판	냉간 압연규소강판
기본파	1	1
제3고조파	0.15 ~ 0.55	0.4 ~ 0.5
제5고조파	0.03 ~ 0.25	0.10 ~ 0.25
제7고조파	0.02 ~ 0.10	0.05 ~ 0.10
제9고조파	0.005 ~ 0.02	0.03 ~ 0.06
제11고조파	0.01 이하	0.01 ~ 0.03

이 인가되면 여자전류는 많은 기수 고조파를 포함한 왜형파가 된다. 그림 8은 변압기의 대표적인 여자전류 파형을 나타낸 것이며, 각 고조파의 크기는 철심의 재질과 자속 밀도에 따라 다르지만 일반적인 사용 조건에서는 표 4와 같다.

표 4에서 보는 바와 같이 제3조파 성분이 가장 크고, 제5, 7조파 순으로 되지만, 제3조파 및 그 배수 조파는 영상성분으로 변압기에 Δ권선을 설치함으로써 Δ권선내를 순환하기 때문에 제3조파 및 그 배수 고조파는 흡수되고 회로에 나타나지 않는다.

이러한 것은 초고압 대형 변압기의 Y-Y인 경우에는 3차 권선을 Δ로 설치하고 보통 변압기 권선의 하나는 반드시 Δ결선으로 하여 제3조파의 순환회로로 이용한다. 또 제7조파 이상은 그 양이 미소하기 때문에 거의 문제되지 않고 현실적으로 문제되는 것은 제5조파이다. 제5조파에 대한 대책은 계통의 선로정수를 고려하여 직렬리액터를 설치하는 것을 검토한다.

(2) 여자전류의 고조파 성분에 의한 고조파 전압

변압기 여자전류에는 고조파 성분이 포함되어 있으므로 변압기 단자로부터 계통을 본 고조파 임피던스에 비례한 고조파 전압이 변압기 단자에 나타난다. 그림 9와 같이 무부하인 변압기 1대만을 전원에서 여자한 경우, 일정한 고조파 전류가 흘러 Z_n 양단에는 고조파 전압 ($V_n = I_n Z_n$) 이 발생한다.

이 변압기에 고조파 임피던스 Z_{cn} 이 되는 콘덴서를 부하로 연결하면, I_n 은 Z_n 과 Z_{cn} 으로 분류되고, 부하전류 I_{cn} 과 그의 단자전압 V_n' 는 식(10)으로 구할 수 있다.

$$I_{cn} = I_n \times \frac{Z_n}{Z_n + (X_n + Z_{cn})} = \frac{V_n}{(X_n + Z_{cn})} \quad (10)$$

$$V_n' = I_{cn} Z_{cn} = I_n \times \frac{Z_n}{Z_n + (X_n + Z_{cn})} \times Z_{cn}$$

여기서, V_n' : 고조파 전압 ($Z_n I_n$)

Z_n : 전원 고조파 임피던스

I_n : 고조파 전류

Z_{cn} : 고조파 임피던스(콘덴서)

X_n : 변압기 누설임피던스의 n차 고조파의 고조파 임피던스

식 (10)에서 변압기 단자측에서 본 임피던스가 전원측과 부하측에서 병렬 공진($Z_n = -(X_n + X_{cn})$)이 형성되면 고조파전류(I_{cn}) 및 고조파전압(V_n')은 대단히 커지

는 고조파 확대 현상이 발생한다.

이와 같이 변압기 여자전류에 의한 고조파가 발생하면 계통 조건(공진)에 따라서는 고조파가 확대되는 현상이 발생할 수 있으므로 유의할 필요가 있다.

라. 절연 열화

절연 열화는 순간적인 1차측 전압 크기와 2차측 전압 증가 비율에 따라 달라진다. 고조파 전압의 발생은 파고치를 증가시켜 절연 열화의 원인이 된다. 고조파 전압으로 인하여 변압기 전압이 높아지고, 절연열화 정도가 빨라진다. 그러나 보통 고조파 레벨에 의한 과전압보다 더 높은 고전압 레벨에 대한 절연이 되어 있어 별 문제가 없다.

5. 대책 및 고찰

고조파 전압과 전류에 의한 변압기 손실은 주파수에 의존하는 것으로 알려져 있다. 주파수 증가에 비례하여 손실도 증가하기 때문에 높은 주파수의 고조파는 변압기 과열 원인으로서는 저차 고조파보다도 훨씬 큰 영향을 미친다.

현재 변압기에 대한 고조파의 영향에 대해서 변압기 관리 기준이 마련되어 있는 것이 없으므로 변압기 과열에 미치는 고조파의 영향 및 변압기 수명에 대한 비선형성을 검토할 필요가 있다. 그리고 고조파 전류가 상한치를 초과하는 경우에는 고조파 유출전류를 저감하여 상한치 이내로 억제하기 위한 대책이 필요하다.

이러한 억제 대책에는 기기로부터 발생하는 고조파 전류 등을 저감시키는 방법과 기기로부터 발생한 고조파 전류를 분류시켜 유출 전류를 저감시키는 방법, 그리고 고조파에 대해서 장애를 받지 않도록 하는 방법으로 크게 3종류로 나눌 수 있다. 변압기에 대한 고조파의 영향을 저감시키기 위해서는 다음과 같은 종합적인 대책을 검토할 필요가 있다.

가. 기기로부터 발생하는 고조파 전류 등을 저감시키는 방법

: 변환장치의 다펄스화

나. 기기로부터 발생한 고조파 전류를 분류시켜 유출 전류를 저감시키는 방법

- ① 리액터(ACL, DCL)의 설치
- ② 콘덴서의 설치(고압측 또는 저압측)
- ③ 필터의 설치(수동필터, 능동필터)

다. 고조파에 대해서 장애를 받지 않도록 하는 방법

- ① 직렬리액터의 용량 증가(전기저널 2001년 5월호 참조)
- ② 계통 분리
- ③ 변압기의 고조파 내량 증가
- ④ 단락용량의 증대

앞으로 고조파 문제는 부하설비의 다양화, 반도체 응용 기기의 사용이 급증함에 따라서 더욱 더 전력품질 문제에 나쁜 영향을 미치리라 예상된다. 그러므로 현장의 전기기술자는 고조파 장애의 심각성을 인식하고 향후 전기사용 장소에서 고조파로 인한 문제가 최소화되도록 많은 관심을 가져야 한다고 사료된다. ■

참고 문헌

1. 박광현, 정해상, 변압기 기술백과, 겸지사, 1990
2. 박민호, 유도기기, 동명사, 1995
3. 강원구, 아몰퍼스 코아 소재 및 변압기의 개발 동향, 대한전기 협회지, No. 7, 1990
4. GB 기획센터, 저항·콘덴서·리액턴스, 한진출판사, 1999
5. 이은철, 기기에 미치는 고조파 장애, 전기안전
6. 강창섭, 현장 실측 왜형파의 유형분석, 전기안전
7. 강창섭, 이흥기 외, 고조파가 물드변압기 수명에 미치는 영향, 전기안전
8. 박지현 외, 전기사용장소의 고조파 장애분석 연구, 한국전기안전공사, 1995
9. 인터넷 자료 yeojoo.ac.kr 및 cheryong.co.kr
10. 강창원, 고조파 SOLUTION, (주)피에스디테크, PSD-H 12, 2000
11. 유상봉 외, 고조파에 대한 의문점을 풀어본다. 전력기술인, No. 12, 1999
12. 郷古良則, 石津友啓, 受變電マニュアル, 電氣書院, 1998
13. 堀越俊夫, 高調波發生のメカニズムとその障害対策, 電氣と工事, 1994
14. 小林義幸, 高調波流出抑制対策, 日本電氣設備學會誌, Vol. 16, No. 4, 1996