

지그재그 권선 변압기 적용을 통한 전력품질개선 및 에너지효율향상

박태영, 박승규, 이 경, 심성현
한국수자원공사

A study of power quality and energy efficiency improvement on power transformer by zig-zag windings

Tae-Young Park, Seung-Gyu Park, Kyong Lee, Sung-Hyun Sim
Korea Water Resources Corporation

Abstract - 산업발전과 전력용 반도체 소자의 비약적인 발달로 부하설비가 첨단화, 자동화 되면서 전력변환장치 등 비선형 부하 사용이 증가하고 있으며, 이에 따라 전력계통에는 고조파와 불평형이 필연적으로 발생하게 된다. 이러한 고조파와 불평형은 전력품질을 악화시킴으로써 설비의 효율 감소는 물론 전기적 사고와 불필요한 전력손실을 야기시키고 있다. 본 연구는 하이브리드변압기 동작원리 및 에너지절감 이론을 연구하고 실제 현장적용을 통한 에너지 절감효과 및 전력품질에 미치는 영향을 분석하였다.

1. 서 론

최근 전력회사와 전기수용가들은 전력품질에 대한 관심이 크게 증가하고 있으며, 에너지절약을 위한 설비의 효율 향상에 많은 노력을 기울이고 있다.

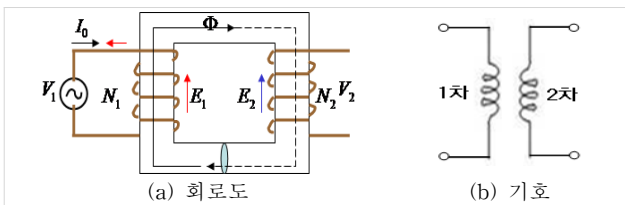
전력용 반도체 소자의 비약적인 발달과 산업발전에 따라 부하설비가 첨단화, 자동화되면서 이들은 대부분 마이크로프로세서와 반도체에 의한 제어방식으로 구성되어 전원품질에 큰 영향을 받고 있으며, 설비의 효율 향상을 위해 전력전자 제어에 의한 전력변환장치, 자동화기기의 사용이 급증하고 있다. 이에 따라 선로상에서 고조파 발생은 날로 증가하고 있으며 발생된 고조파는 전원계통에 유입되어 여러 가지 문제를 일으키고 있다. 고조파 발생원이 회로에 접속되어 있을 경우 고조파 전류는 송·배전 계통을 통하여 발전소 측으로 유입되어 고조파 전압을 발생시키고, 이는 기본파 전압과 중첩되어 왜형파를 생성시킨다. 이러한 왜형파는 회로에 연결된 모든 기기에 다시 유입되어 전력 품질을 악화시키게 된다. 계통상에 다양한 종류의 설비들에 고조파 전류가 유입될 경우 설비의 오동작, 공진현상 발생, 전류 실효치 증대, 단자전압의 상승, 콘덴서 실효용량 증대, 고조파 전류에 의한 전력손실 증대 등 계통 전체에 악영향을 미친다. 따라서 고조파로 인한 피해를 예방하고 전력 품질을 향상시켜 설비 효율을 높이기 위해서는 고조파에 대한 경제적이고 효율적인 대처 방안이 필요하다.

본 연구에서는 변압기능과 고조파 감쇄기능을 갖는 하이브리드변압기 적용을 통한 배전계통 양질의 전력 공급은 물론 전력손실을 감소시켜 에너지 절약에도 일조할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 본 론

2.1 변압기 원리와 구조

변압기는 철심과 2개 또는 3개 이상의 권선으로 구성되어 있고, 하나 또는 둘 이상의 회로로부터 교류 전력을 받아 전자유도작용으로 전압 및 전류를 변형해서 다른 회로에 동일 주파수의 교류 전력을 공급하는 기기이다. 아래 그림1은 기본 구조를 보인 것이다.



〈그림 1〉 변압기의 회로 구성

1차 권선과 2차 권선은 전기적으로 분리되어 있으나 자기적으로는 결합되어 있다. 1차 및 2차 권선의 권수를 N_1 및 N_2 로 하고, 1차 권선에 주파수 f 의 전압 V_1 을 인가하면 철심 내에 $\Phi = V_1 / 4.44fN_1$ 의 교번자속이 발생하고, 이 교번자속에 의해 2차 권선에 $V_2 = 4.44fN_2\Phi$ 의 전압이 유도된다. 따라서 $V_1/V_2 = N_1/N_2$ 가 되어 2차측에 권수에 비례한 전압을 얻을 수 있다. 다음으로 2차측에 부하를 연결해 부하전류 I_2 를 흘렸을 때, 여자전류를 무시하면 I_2 에 의해 발생된 기자력 I_2N_2 와 평형을 유지하기 때문에 1차 측에 $I_1N_1 = I_2N_2$ 를 만족시킬 수 있도록 그 권수에 반비례한 전류가 유입된다. 따라서 $V_1I_1 = V_2I_2$ 가 되고, 2차측 회로

에 전압 및 전류를 변성한 교류전력을 공급할 수 있다. 실제 변압기에서는 여자전류, 권선저항, 누설자속으로 인한 리액턴스 등 때문에 정확하게 위와 같이 되지는 않고 $V_1I_1 > V_2I_2$ 가 된다.

2.2 고효율 변압기 동향

기존의 방향성 규소강판 대신 아몰퍼스 메탈(Amorphous Metal)을 철심 소재로 사용하여 무부하손(철손)을 기존변압기의 75% 수준으로 낮춘 아몰퍼스 변압기 개발과 '고효율 에너지 기자제 기준'(지경부 고시)에 전력용 변압기 항목 추가로 고효율 변압기가 등장하였다. 초기 고효율 에너지 기자제 기준은 부하율 100%에서 무부하손 및 효율을 규정함으로써 아몰퍼스 철심 소재만을 사용해야 했다. 하지만 기준이 2007년 7월 부하율 20%~80%별 총 손실로 규정이 변경됨에 따라 현재는 철심 소재로 아몰퍼스 메탈과 자구미세화 규소강판 모두 사용 가능하게 되었다.

〈표 1〉 우리나라 고효율 변압기 기준

1차/2차 전압[kV]	용량 [kVA]	부하율 [%]에 따른 총손실 [W]							
		20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	
22.9	100	213	312	451	630	848	1105	1355	
	150	294	423	604	838	1122	1459	1812	
	200	368	536	770	1072	1405	1739	2125	
	300	476	698	1010	1410	1899	2414	2957	
	400	567	834	1215	1704	2302	2960	3639	
	500	639	947	1377	1931	2608	3407	4211	
	600	723	1090	1603	2263	3069	3834	4671	
	750	886	1318	1922	2700	3561	4377	5319	
	저압	1000	1063	1576	2293	3216	4188	5183	6332
		1250	1232	1772	2527	3499	4686	5812	6332
1500		1590	2203	3601	4164	5511	6919	8441	
2000		1940	2740	3860	5300	7060	9140	11200	
2500		2340	3265	4560	6225	8260	10665	13440	
3000	3120	4145	5580	7425	9680	12345	15420		

2.3 고조파 발생원과 영향

2.3.1 고조파 발생원

계통에 존재하는 고조파 전류의 발생원은 크게 세 가지로 분류할 수 있으며, 그 외에도 일시적 고조파 발생기기가 존재한다.

- 변압기 및 회전기의 포화 특성에 의한 고조파
- 변압기 철심은 히스테리시스 현상이 있어 정현파 교류전압을 인가하면 여자전류는 고조파를 포함한 왜형파가 된다. 이 때 발생하는 고조파의 크기는 철심의 재질과 자속밀도에 따라 다르지만 보통의 상태에서 대략 표2와 같이 제 3고조파 성분이 가장 크게 나타난다. 이러한 2고조파 및 그 배수의 영상분 고조파는 변압기 결선을 Δ 형태로 함으로써 Δ 권선 내를 순환하기 때문에 제3고조파 전류는 흡수되고 회로에는 나타나지 않는다.

〈표 2〉 여자전류의 고조파 크기

고조파	열연 압연 규소강판	냉간 압연 규소강판
기본파	1	1
제 3고조파	0.15 ~ 0.55	0.4 ~ 0.5
제 5고조파	0.03 ~ 0.25	0.10 ~ 0.25
제 7고조파	0.02 ~ 0.10	0.05 ~ 0.10
제 9고조파	0.005 ~ 0.02	0.03 ~ 0.06
제 11고조파	0.01 이하	0.01 ~ 0.03

- 전력변환장치로 인한 고조파
- 부하설비의 첨단화, 자동화로 인하여 계통에는 전력변환장치가 증가하고 있으며, 이러한 전력변환장치는 필연적으로 고조파를 유발시키고 있다. 현재 사용되고 있는 전력전자소자 응용기기를 살펴보면 교류를 직류로 변환하여 부하에 공급하는 정류기, 여러 가지 용도로 사용되는 인버터와 UPS, 교류를 상이한 주파수로 변환하는 싸이클로컨버터, 싸이리스터 제어에 의하여 부하에 주는 교류전력을 조정하는 전력조정기 등이 있다.

2.3.2 고조파의 영향

고조파 전류는 임피던스가 낮은 전원측에 유입되어 전기설비에 여러가지 장애를 유발시키고 있으며, 산업현장에서는 고조파로 인한 피해 예방을 위해 능동고조파필터, L-C필터, K-factor 변압기, 리액터, 위상변이TR 등을 설치하고 있으나 이러한 장치들은 경제성, 효율성 측면에서 한계점을 안고 있다.

· 콘덴서에 미치는 영향

고조파 전류가 콘덴서로 유입될 경우 콘덴서의 과열은 물론 콘덴서 단자전압 상승으로 콘덴서 내부소자나 절연을 파괴시키며, 유전체 손실이 증가하고 내부소자의 온도가 상승하여 콘덴서의 열화를 촉진시키는 요인이 된다.

· 변압기 및 유도전동기에 미치는 영향

변압기에 고조파 전류가 유입되면 코일의 표피효과에 의해 동손이 증가하여 전력손실 및 권선온도 상승과 변압기 용량의 감소를 초래하며, 또한 철심에 히스테리시스 손실 및 와전류 손실이 증가하여 철손을 증가하며, 유도전동기의 경우 철손과 동손이 증가하고 토크 저하, 진동, 소음이 발생한다.

· 중성선 및 MCCB에 미치는 영향

일반적으로 중성선의 굵기는 다른 상과 같게 선정하고 있는데 영상분 고조파에 의하여 중성선에 많은 전류가 흐르게 되면 케이블이 과열되고, 중성선과 대지간의 전위차로 인해 중성점 전위가 상승하게 된다. 또한, 제 3고조파는 기본파의 3배인 180Hz의 주파수 성분을 갖기 때문에 표피효과에 의해 케이블의 유효단면적을 감소시켜 저항이 증가하므로 케이블 및 MCCB의 과열 현상은 더욱 증가한다.

· 기타 고조파가 미치는 영향

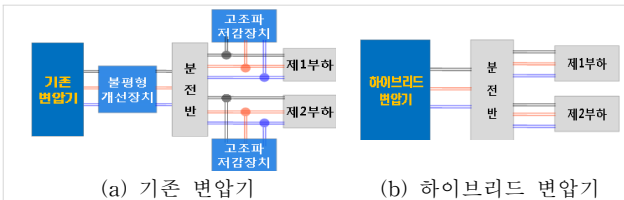
고조파 전류는 차단기, 계측기, 보호계전기의 오동작을 초래할 뿐 아니라 역률저하, 공진발생, 전력손실 등 계통에서 여러가지 장애 현상으로 유발하고 있다.

2.4 하이브리드 변압기

2.4.1 하이브리드 변압기 개념

하이브리드 변압기란 고조파와 불평형 개선 기능을 갖는 다기능 변압기로서 배전용 변압기를 의미한다. 즉, 기존의 변압기는 단순하게 변압기능만 갖춘 설비이기 때문에 선로에서 고조파 또는 불평형을 줄이기 위해서는 반드시 별도의 전기설비를 추가로 설치해야만 했으나, 하이브리드 변압기는 지그재그 권선법을 통해 고조파와 불평형 감쇄 그리고 변압기능을 동시에 수행하루 수 있으므로 별도의 전기설비를 둘 필요가 없다.

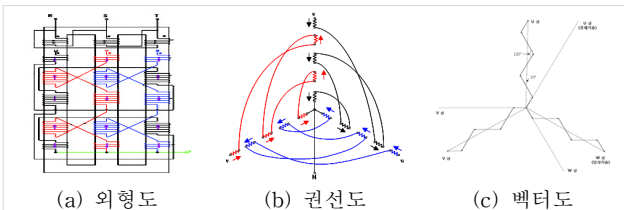
따라서 기존의 변압기 설비 투자방식에 비해 투자비용 절감과 설치공간 축소 그리고 전기설비의 효율을 개선시켜 에너지절약은 물론 고조파에 의한 피해도 줄일 수 있다.



〈그림 2〉 변압기 설비 배치도

2.4.2 Zig-Zag 권선법

불평형 및 고조파 감쇄 기능을 갖는 Zig-Zag 권선법은 그림3에서 보여주듯이 각 상 레그에서 2개 이상의권선이 상호 교차하는 형태이며, 각 상의 자속이 정상과 역상이 되도록 설계되어진다. 이처럼 각 상에서 정상과 역상이 교차하고 Zig-Zag 권선을 통해 30° 위상을 제어함으로써 부하에서 발생하는 고조파 전류는 상쇄되고, 불평형 전류는 억제시키게 된다.



〈그림 3〉 Zig-Zag 권선과 벡터도

※ 기존 일반적인 Zig-Zag 권선법은 단권 변압기로서 제작이 간단하다는 장점이 있지만 복권 형태의 전력용 변압기로 제작할 경우에는 수직 권선법에 의한 누설자속증가, 절연문제, 외형확대 등 기술적 한계점이 존재한다.

2.4.3 하이브리드 변압기의 특징

하이브리드 변압기의 구조상 특징을 살펴보면 철심은 자구미세화 강판을 적용하여 저소음 고효율 특성을 유지하였으며, 지그재그 권선법을 통하여 고조파 및 불평형에 의한 철손 및 동손을 최소화 시킨 구조이다.

〈표 3〉 기존변압기 vs. 하이브리드변압기 특성 비교

구분	하이브리드	저소음	아몰퍼스	일반	
총 손실	철손[W]	1,748 56%	1,748 56%	555 19%	3,100 100%
	동손[W]	7,140 64%	7,140 64%	9,890 89%	11,100 100%
	총손실[W]	8,888 63%	8,888 63%	10,475 74%	14,200 100%
효율(100%부하시)	99.12%	99.12%	98.96%	98.60%	
주요기능	변압기능	○	○	○	○
	고조파감쇄	○	-	-	-
	불평형개선	○	-	-	-
유리한 부하율[%]	50% ↑	70% ↑	40% ↓	N/A	
소음[dB]	54	60	70	70	

※ 기준용량 : 3상 1,000kVA, 22.9kV/0.38kV

2.5 절감전력 산출

2.5.1 고조파 제거를 통한 전력절감 산출 방법

$$\text{전력손실 산출공식} : P_{THD} = 3(I_{THD}^2 / 2 \times R_L)$$

- ① 선로에서 발생되는 전체 전력손실 산출
- ② 고조파 성분에 의해 발생되는 전력손실 산출
- ③ 전체 전력손실에 대한 고조파 성분 전력손실 비율산출

2.5.2 현장진단 결과

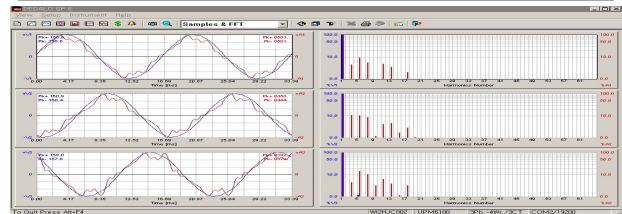
한국수자원공사 아산정수장에 현장 적용성 진단을 실시하였으며, EMS9200 전력분석기를 이용하여 30초 간격으로 1시간 전력품질을 측정하여 그 평균값으로 예측진단결과 6% 내외의 에너지절감 예상된다.

· 대상사업장 변압기 제원 및 현황

- 용도 : 아산정수장 배전변압기(동력, 전등, 전열부하)
- 용량 : 3Φ, 1,000kVA, 22.9kV/380V
- 계약전력 : 1,000kVA - '10년 Peak 전력 : 487kW

〈표 4〉 전력분석결과

전류 [A]	역률 [PF]	유효전력 [KW]	무효전력 [Kvar]	피상전력 [KVA]	불평형 [%]	I _{THD} [%]
207	0.97	133.6	17.7	137.4	10.4	19.6



〈그림 4〉 전압-전류 파형 및 고조파 그래프

3. 결 론

전력망에서 배전용 변압기에 의한 손실을 저감시키기 위해 아몰퍼스나 저소음고효율 변압기 등이 보급되어 사용되고 있다. 이는 비선형부하의 급격한 증가에 따라 발생하는 고조파에 의한 전력품질 저하와 전력손실 문제에 대한 해결책이 되지 못하며, 이에 대한 대안으로 변압기능과 고조파 감쇄, 불평형 개선 등의 다기능의 하이브리드변압기를 적용함으로써 경제성 및 효율성을 높일 수 있다. 한국수자원공사 아산정수장 배전용 변압기에 적용 예정이며, 현장진단결과 예상 절감률은 6%로 적용시 전력품질 개선과 전력량 절감에 크게 기여할 것으로 판단된다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] 전력연구원, "배전계통의 3배수 고조파 발생 및 원인규명", 2003년
- [2] 신대철, 민윤홍, "Zig-Zag 권선에 의한 내철형 주상변압기 개발에 관한 연구", 조명전기설비학회 논문지, 2007년
- [3] 김세동, "고효율, 친환경, 자기진단을 고려한 전력용변압기 기술동향", 2002년
- [4] 박광현, 정해상, "변압기 기술백과", 겐지사, 2002년
- [5] 김중기, "전기기기", 보성각, 2002년
- [6] LS산전, "고효율변압기 국내외 동향과 전망", 2007년
- [7] ABB코리아, "아몰퍼스 고효율 몰드변압기와 레이저 저소음 고효율 몰드변압기", 2007년
- [8] 박훈양, "Zig-Zag 권선을 이용한 불평형 및 고조파 감쇄 기능을 갖는 변압기에 관한 연구", 2010년