

고조파 저감형 하이브리드 변압기의 성능시험

Performance Test and Design of Harmonic Reduction Hybrid Transformer

김 지 호* · 한 성 호** · 손 진 근†
(Ji-Ho Kim · Sung-Ho Han · Jin-Gun Son)

Abstract - Hybrid transformer means the distribution transformer, one of multi-function transformer equipped with the enhancement function of harmonics and unbalance. In other words, since existing transformer are equipped simply with transformation function only, a separated electric facility should be additionally installed in order to reduce the mutual harmonics and unbalance. Meanwhile, since hybrid transformer can perform the reduction of harmonics and unbalance as well as transformation function simultaneously through zigzag winding, it doesn't need any additional electric facility. This study addressed the issue of developing and testing the performance of a generator that would reduce the harmonics supplied to the grid when grid-connected with the output of a photovoltaic inverter for photovoltaic generation system.

Key Words : Hybrid transformer, Harmonic reduction, Zigzag winding.

1. 서 론

사회가 고도화됨에 따라 사회의 전력에 대한 의존도는 더욱 증대되고 있어 정전에 대한 민감성이 더욱 커지고 있을 뿐만 아니라 전력품질에 대한 요구도 고급화, 다양화하고 있다. 그러나 전력의 사용 환경은 반도체 전력기기의 확대 보급, 고속 장거리 전기철도의 건설 및 대형 아크로의 운전, 비선형 부하의 증가 등으로 과거보다 악화되고 있으나 전력 융통설비의 증설은 환경보존주의, NIMBY(Not in my backyard) 현상의 확산으로 인하여 많은 제약을 받고 있어 요구되는 고 신뢰도, 고 품질의 전력공급은 더욱 어려워질 전망이다.

최근의 전기 사용의 양태 측면에서 보면 전력사용기술이 비약적으로 발달하여 전력공급기술이 전기사용기술의 변화에 부응하여야 할 시점에 와 있다고 말할 수 있다. 즉, 최근의 전력전자기술의 발달에 의하여 전력변환이 용이해 지고 에너지 절약의 필요성이 증대되어 직류를 사용하는 전기장치가 늘어가고 있는 추세이다. 전력용 반도체 소자의 비약적인 발달과 산업발전에 따라 부하설비가 첨단화, 자동화되면서 이들은 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.

또한 전기철도의 경우도 사용되고 있는 견인전동기는 유

지보수의 관점에서 비교적 제어가 용이하였던 직류전동기 대신 교류전동기가 최근 널리 사용되고 있는데, 이러한 교류전동기에는 인버터에 의하여 주파수와 전압제어를 한 교류전력이 사용된다. 그러나 인버터의 앞단은 항상 직류를 필요로 하므로 전력의 최종 사용형태가 교류라 할지라도 1차적인 입력전원이 교류이면 직류로의 변환은 필연적이다. 따라서 송전 교류전원을 바로 사용하지 않고 이를 직류로 변환하여 사용하게 되므로, 그만큼 장치가 복잡해지고 역률이 저하하거나 고조파가 발생하는 역작용이 발생하게 되었다.

전력전자 기기들의 동작에 의하여 고조파 전류가 흐르게 되고 전압 파형의 왜곡이 발생하는데, 이러한 전력전자 기기들은 제어하지 않는 교류 전력을 그대로 사용하는 부하에 비하여 전압의 불안정, 전압의 불평형, 전압의 왜형에 민감하다. 전력전자기술을 사용하는 부하의 크기가 그리 크지 않고 널리 확산되어 사용되지 않았던 때에는 전력변환기들이 발생시키는 역작용이 크지 않아 문제가 되지 않았으나, 거의 모든 전기에너지가 전력변환기기를 연계하여 사용되는 현재의 시점에서는 전력변환기기의 오동작도 일어날 소지가 있어 이를 전기 환경문제로 인식하여야 할 시점에 도달하였 다[1][2].

고조파 발생원이 회로에 접속되어 있을 경우 고조파 전류는 송·배전 계통을 통하여 발전소 측으로 유입되어 송·배전 계통의 각 스텝 임피던스에 고조파 전압을 발생시키고, 발생된 고조파 전압은 기본파 전압과 중첩되어 왜형파를 생성시킨다. 이러한 왜형파는 회로에 연결된 모든 전기기기에 다시 유입되어 전력 품질을 악화시키게 된다. 한편으로 계통 상에는 다양한 종류의 설비들이 연계되어 운용되고 있고, 이러한 설비에 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[2].

따라서 고조파로 인한 피해를 예방하고 전력 품질을 향상

† 교신저자 : 가천대학교 전기공학과 교수 · 공박

E-mail : shon@gachon.ac.kr

* (주)에너테크 기술연구소장 · 공박

** 한국철도기술연구원 수석연구원 · 공박

접수일자 : 2014년 11월 7일

수정일자 : 2014년 11월 25일

최종완료 : 2014년 11월 26일

시켜 설비효율을 높이기 위해서는 고조파에 대한 경제적이고 효율적인 대처방안이 필요하다. 지금까지 보편적으로 사용되던 고조파에 대한 대처방안으로는 수동필터나 능동필터, 리액터, 위상변위(Phase shift) TR을 설치하는 방법이 있다. 이처럼 고조파로 인한 피해를 예방하기 위하여 여러 가지 방법이 시도되고 있으나 전기설비의 기본이 되는 변압기와 별도의 독립적인 투자 설비로 인하여 투자비 증가와 설치공간을 확보해야 하는 부담이 있었으며, 투자설비의 효율성과 안정성 측면에서는 여전히 신중한 접근이 필요하다[3][4].

이에 본 연구는 이중 Zig-Zag 권선을 이용한 불평형 및 고조파 감쇄 기능을 갖는 하이브리드 변압기 개발을 통하여 기존 변압기 방식에서 문제가 되고 있는 고조파로 인한 신규 설비 투자비 증가와 설치 공간 확보에 따른 부담을 크게 완화시켰고, 무엇보다 변압기능과 고조파 감쇄기능을 갖는 고효율의 고조파 저감형 변압기 개발을 통하여 고조파로 인한 피해를 예방함은 물론 전력품질을 개선함으로써 불필요한 전력손실을 억제하여 에너지 절약에도 기여할 수 있다. 변압기의 성능시험을 위해 일반 변압기와 zigzag 변압기를 제작하였다. 두 변압기의 특성 및 효율은 동일한 조건으로 하였으며, 고조파 개선을 목적으로 저항 부하와 정류기 부하로 제품의 자체 성능시험을 실시하였다.

2. Zig-Zag 권선법

2.1 Zig-Zag 권선법

불평형 및 고조파 감쇄 기능을 갖는 Zig-Zag 권선법은 그림 1에서 보여주듯이 각 상 레그에서 2개 이상의 권선이 상호 교차하는 형태이며, 각 상의 자속이 정상과 역상이 되도록 설계되어 진다. 이처럼 각 상에서 정상과 역상이 교차하고 Zig-Zag 권선을 통해 30° 위상을 제어함으로써 부하에서 발생하는 고조파 전류는 상쇄되며, 불평형 전류는 억제시키게 된다.

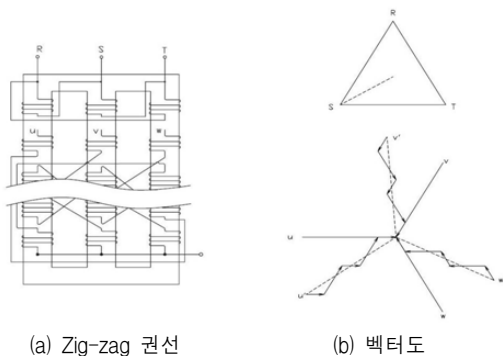


그림 1 Zig-Zag 권선과 벡터도
Fig. 1 Zig-Zag winding and Vector diagram

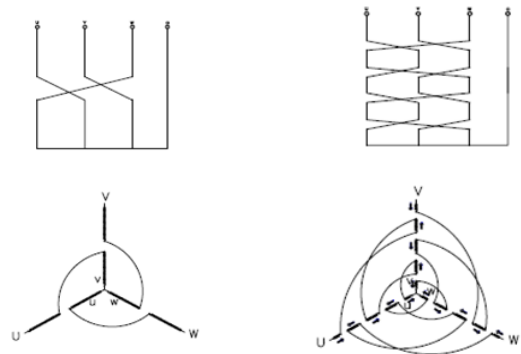
Zig-Zag 권선에 있어서 가장 염두해 두어야 할 부분이 절연에 관한 부분으로 설계 기술에 따라 변압기의 외형과 안전성에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라 제조 비용에도 직결되는 중요한 사항이다. 따라서 이러한 제조상의 기술적 부분을 해결하고 변압기의 효율성과 경제성을 극대화하기 위

해 고압부문인 1차 권선은 Δ 결선, 저압부문인 2차 결선은 Zig-Zag 권선법에 의한 평면 설계 기법을 도입하여 누설자속 감소와 부분방전으로 인한 기술적 과제를 극복할 수 있었다[2].

2.2 Zig-Zag 권선법의 비교

기존의 일반적인 지그재그 권선법은 권선에서 발생하는 전자 기계력을 줄여서 변압기 권선을 보호할 목적으로 고안되었으나 현재는 주로 접지용 변압기 용도나 영상고조파 필터 기능으로 이용되고 있다. 단권변압기로서 제작이 간단하다는 장점이 있지만 복권 형태의 전력용 변압기로 제작할 경우에는 수직 권선법에 의한 누설자속증가, 절연문제, 외형 확대 등 기술적 한계점이 존재하게 된다[2][4][5].

이에 반하여 하이브리드 변압기의 지그재그 권선법은 기존 방식의 기술적인 단점을 보완하여 효율과 성능을 크게 개선시킴으로써 전력용 변압기 제작은 물론 설계용량을 크게 향상시켰다. 또한 수평 권선법에 의한 설계 기법을 통해 지그재그 권선에서 가장 문제가 되었던 누설자속과 절연문제를 해결하였으며, 제품을 소형화 할 수 있게 되었다.



(a) 기존 Zig-Zag 권선법 (b) 하이브리드 Zig-Zag 권선법

그림 2 Zig-Zag 권선법 비교
Fig. 2 Comparison of Zig-Zag winding

하이브리드 변압기 Zig-Zag 권선법은 그림 3에서 도시된 바와 같이 2차 코일의 제 1권선은 제 1레그, 제 3레그, 제 1레그 순으로 반복 권취하고, 제 2권선은 제 2레그, 제 1레그, 제 2레그 순으로 반복 권취한다. 동일한 방법으로 2차 코일의 제 3권선은 제 3레그, 제 2레그, 제 3레그 순으로 반복 권취한 후 제 1권선, 제 2권선 및 제 3권선은 각각 중성선(N)에 연결되도록 결선한다.

한편, 2차 코일의 제 1권선은 제 1레그 및 제 3레그에서 서로 반대방향으로 권취되며, 제 2권선은 제 2레그 및 제 1레그에서 서로 반대 방향으로 권취하게 된다. 또한 제 3권선은 제 3레그 및 제 2레그에서 서로 반대방향으로 권취한다. 이러한 권선의 설계를 통해 각각의 레그 상에서 자속의 크기는 동일하지만 부하에서 발생한 전류의 위상이 서로 반대가 되어 영상분 자속을 상쇄시킴으로써 고조파 및 불평형 전류는 자연적으로 감소하게 된다.

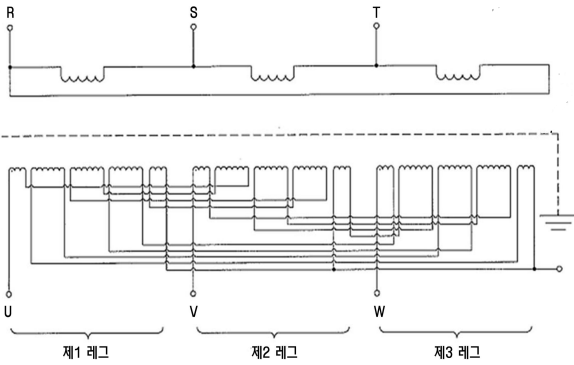
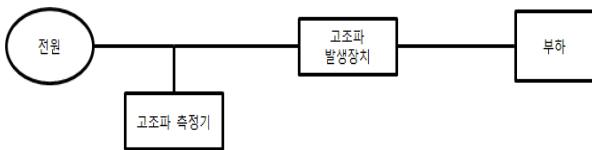


그림 3 하이브리드 변압기 Zig-Zag 권선도
Fig. 3 Zig-Zag winding of Hybrid Transformer

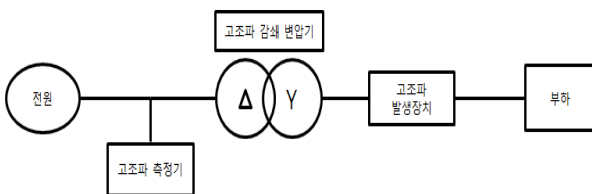
3. 하이브리드 변압기의 설계 및 성능시험

3.1 고조파 측정시험의 개요

고조파 발생에 대하여 하이브리드 Zig-Zag 권선 변압기 (이하 하이브리드 변압기)의 고조파 저감 성능을 측정하기 위하여 고조파 발생장치의 고조파를 측정하고 하이브리드 변압기 삽입 후 고조파를 측정하여 비교 분석하였다. 그림 4와 같이 고조파 성능 측정시험에 대한 시험회로도를 바탕으로 그림 5와 같은 고조파 측정시험장치를 구성하였다. 고



(a) 고조파 발생장치의 고조파 측정 회로도



(b) 변압기 삽입 후 고조파 측정 회로도

그림 4 고조파 측정 시험회로도
Fig. 4 Test circuit for harmonic measurements



그림 5 고조파 측정 시험 장치
Fig. 5 Test apparatus for harmonic measuring

조파 측정을 위해 THD(Total Harmonic Distribution) 측정 및 차수별 고조파 크기와 위상각을 측정할 수 있는 장비는 그림 6과 같이 일본 HIOKI 사의 Power Quality Analyzer PW 3198을 이용하여 각 요소를 측정하고 HIOKI PQA-HIVIEW Pro 9624-50을 이용하여 분석하였다. 전원품질 분석 장비의 측정 제원 및 성능은 아래의 표 1과 같다.



그림 6 Power Quality Analyzer PW 3198
Fig. 6 Power Quality Analyzer PW 3198

표 1 PW 3198의 측정성능
Table 1 Measuring Performance of PW 3198

항 목	측 정 성 능
전체성능	8 Channel (4 Voltage & 4 Current)
측정라인	단상2선식/단상3선식/3상3선식/3상4선식은 물론, 별도 ch4로 전압/전류 측정(직류 또는 교류)
정밀도	전압: 공칭전압의 $\pm 0.1\%$, 전류·전력: $\pm 0.2\%$, rdg: $\pm 0.1\%$ IEC 61000-4-30 Class A
전압과 전류	실효치(RMS), 파형(waveform), 최소(min), 최대(max), 평균(avg)
전력품질	파형 외란, 불평형, 최대치, 주파수, 스웰, 딥, 순간정전, 돌입전류
전력	유효전력, 피상전력, 무효전력, 역률
고조파	전압, 전류 1차~50차 IEC 61000-4-7 Second Edition
플리커	IEC 61000-4-15

3.2 30kVA 변압기의 고조파 성능시험

30kVA 하이브리드 변압기의 고조파 저감 특성을 측정하기 위하여 부하 9kW, 15kW, 19kW일 때 고조파 발생장치에서의 고조파 측정 결과와 변압기 삽입시의 고조파 측정결과를 비교분석하였다. 시험에 사용된 변압기의 제원은 3상 3선식의 정격전압 380V/380V (변압비 1:1), 정격전류 45.6A의 변압기이며, 측정된 결과는 변압기 1차측의 고조파 왜형을 및 전류를 측정하였다. 측정된 결과는 그림 7과 같이 각 부하에서의 고조파를 측정한 결과이다. 표 2는 각각의 부하에서 변압기의 유무에 따른 고조파 왜형률 및 고조파 전류를 각각의 상에서 측정한 결과이며, 그림 8은 각각의 부하에서 발생된 고조파를 1차부터 20차수의 고조파 분포를 나타

낸 것이다. 9kW 부하에서 고조파 왜형률은 전체적으로 약 45% 감소하였고, 고조파 전류는 약 25% 감소하였다. 15kW 부하에서는 고조파 왜형률은 전체적으로 약 52% 감소하였으며, 고조파 전류는 약 27% 감소하였다. 18kW 부하에서는 고조파 왜형률은 전체적으로 약 56% 감소하였으며, 고조파 전류는 약 29% 감소하였다. 또한 차수별로 많은 감소율을 보인 고조파 차수는 5, 7, 9, 11, 15 차수의 고조파가 많은 감소를 보인 것을 확인할 수 있었다.



(a) 부하 9kW (변압기 삽입 전) (b) 부하 9kW (변압기 삽입 후)



(c) 부하 15kW (변압기 삽입 전) (d) 부하 15kW (변압기 삽입 후)



(e) 부하 18kW (변압기 삽입 전) (f) 부하 18kW (변압기 삽입 후)

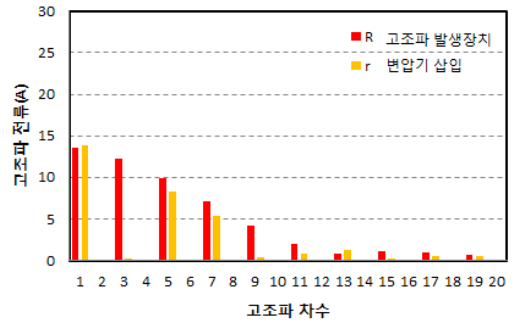
그림 7 변압기의 고조파 측정(삽입 전, 후)

Fig. 7 Harmonic measurements of Transformer (insertion either before and after)

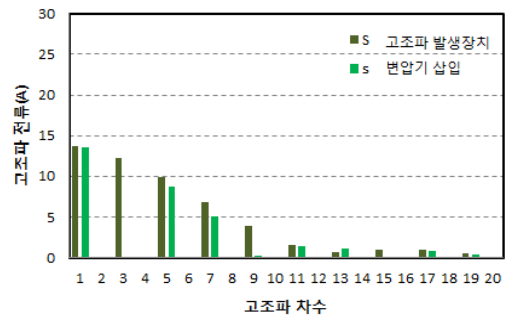
표 2 변압기 삽입 전, 후의 고조파 측정 결과

Table 2 Harmonic measurements of Transformer (insertion either before and after)

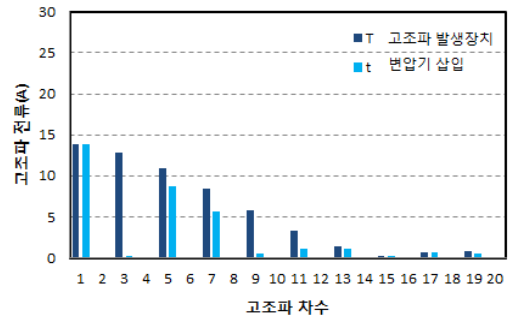
구분		R상		S상		T상	
		無	有	無	有	無	有
고조파 왜형률 (%)	9kW	132.71	73.1	130.1	75.86	144.93	76.05
	15kW	121.65	58.42	121.45	60.84	133.11	61.64
	18kW	117.63	52.271	119.28	54.495	129.43	55.057
고조파 전류 (A)	9kW	22.62	17.22	22.54	17.14	24.38	17.51
	15kW	34.9	25.89	35.38	25.91	37.56	26.4
	18kW	41.17	30.06	41.93	30.07	44.52	30.56



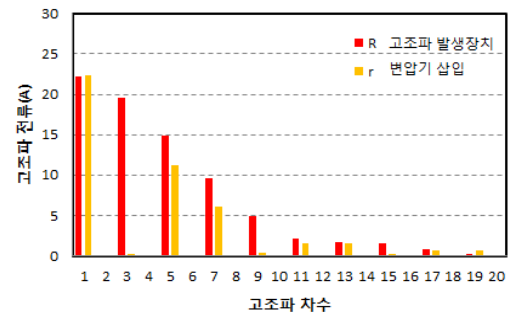
(a) 9kW 부하 (R상)



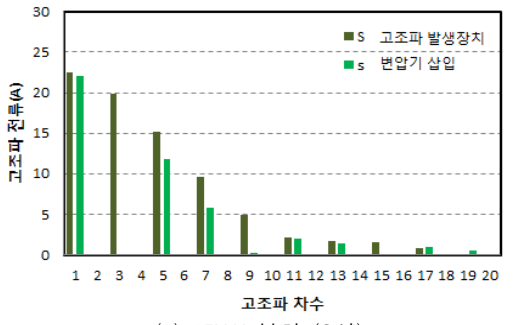
(b) 9kW 부하 (S상)



(c) 9kW 부하 (T상)



(d) 15kW 부하 (R상)



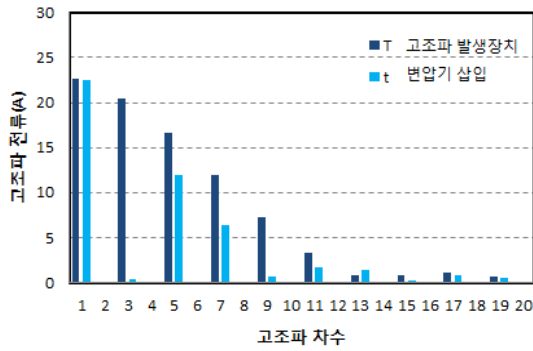
(e) 15kW 부하 (S상)

4. 결 론

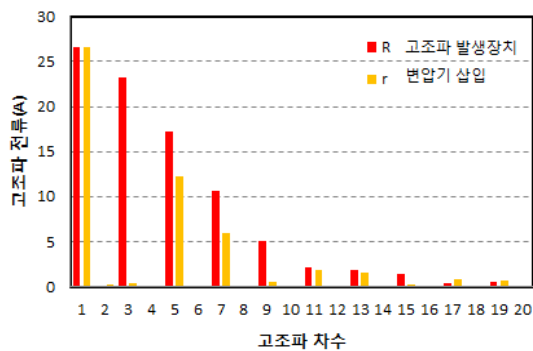
본 논문을 통하여 하이브리드 Zig-Zag 권선을 이용한 불평형 및 고조파 감쇄 기능을 갖는 변압기의 고조파 감쇄 성능을 확인할 수 있었다. 하이브리드변압기의 고조파 저감 성능을 측정하기 위하여 정류기 부하를 이용한 고조파 발생 장치의 고조파를 측정하고 하이브리드변압기 삽입 후 고조파를 측정하여 비교분석하였다. 부하별 감소율을 측정하기 위하여 9kW, 15kW, 18kW의 부하를 선정하고, 각각의 결과를 비교하였을 때 전체적으로 고조파 왜형률은 약 50%의 감소를 보였으며, 고조파 전류는 27%의 감소를 보였다. 이러한 결과를 바탕으로 배전계통에서 하이브리드변압기를 사용할 경우 고조파로 인한 전력손실 감소 효과 이외에도 고조파를 줄이기 위해 별도의 고조파 필터를 설치할 필요가 없으므로 설비투자 및 설치 공간 감소에 따라 투자비용 절감도 기대할 수 있다.

References

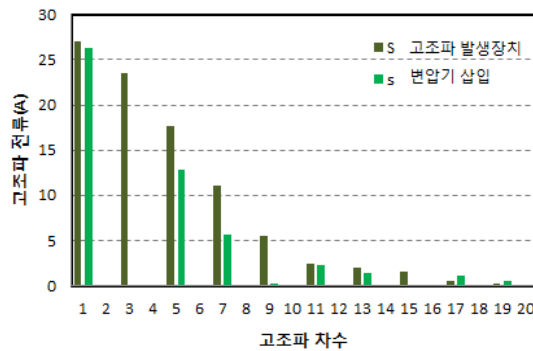
- [1] A.A. Mohmoud, R.D. Shultz, "A method for analyzing harmonic distribution in AC power systems". IEEE Trans., PAS-101, pp151-161, Aug. 1982.
- [2] P.P. Khera, "Application of zig-zag transformers for reducing harmonics in the neutral conductor of low voltage distribution system" Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the IEEE, 7-12pp. 1092 vol.2, Oct.1990.
- [3] J.I Jang, D.C. Lee, H.G. Kim, "Current Control of Three-Phase PWM Converters under Unbalanced and Distorted Source Voltage", Journal of power electronics, Vol 12, No. 1, 2007.02.
- [4] K.C Kim, "A Study on the Harmonics Reduction using Phase Shifting Transformer in a Electric Power Distribution System", Journal of the korean institute of Illuminating and Electrical installation Engineers Vol, 16.No 2,pp. 38~44 March 2002
- [5] Y.B Song, Y.H Cho, D.J Choi, "Development of the Harmonics Reduction and Energy Saving Equipment in Variable Loads", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 20, No.6, pp. 87~95 July 2006
- [6] Y.H Min, D.C Shin, "A study on the Development of the Shell-type Pole Transformer Using the Zig-Zag Winding", Journal of the korean institute of Illuminating and Electrical installation Engineers Vol, 21.No 8, pp. 121~128 March 2007



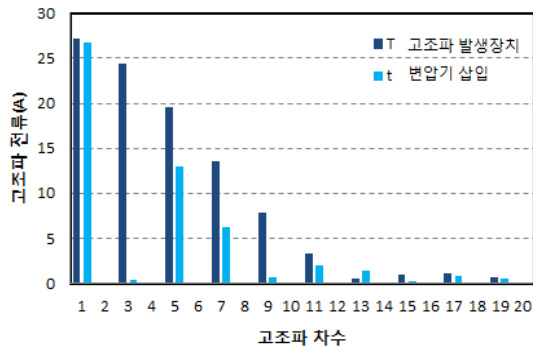
(f) 15kW 부하 (T상)



(g) 18kW 부하 (R상)



(h) 18kW 부하 (S상)



(i) 18kW 부하 (T상)

그림 8 고조파 차수별 결과 비교

Fig. 8 Comparison of the results according to harmonic order

저 자 소 개



김 지 호 (金 志 滿)

2004년 숭실대 전기공학과 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 (주)에너지테크 기술연구소장



한 성 호 (韓 成 浩)

1991년 2월 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1993년 2월 숭실대학교 대학원 전기공학과 석사 졸업. 1996년 3월 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사 졸업. 1996년 7월 ~ 현재 한국철도기술연구원 수석연구원



손 진 근 (孫 珍 勗)

1990년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1992/1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사/박사). 2002. 2~2003. 2 일본 가코시마대학 전기공학부 Post-doc. 2009. 1~2010. 2 Michigan State University 방문교수. 2013-현, 당학회 회원교육이사/평의원. 1997년-현재, 가천대학교 전기공학과 교수.

E-mail : shon@gachon.ac.kr