

영상분 및 역상분 고조파 제거를 위한 변압기 결선방식

Winding Method of Transformer for Zero-Sequence and Negative-Sequence Harmonic Elimination

김 태 훈* · 박 준 열†
(Tae-Hoon Kim · Jun-Yeal Park)

Abstract - As the various kinds of load who generate higher harmonics increases according as the power electronics technology develops, harmonic treatment standard is proposed by IEEE and IEC. Because establishment of harmonic reduction device is required for existent installment to satisfy harmonic treatment standard, the problem of investment charge and installation space increasing may be occurred. In order to solve these problems, a novel transformer connection method using principles of PCT and ZED is suggested.

Key Words : Winding method of transformer, Harmonic, Phase compensating transformer

1. 서 론

전기기기의 효율적 제어를 위한 전력전자기술이 발전하면서 가전제품, 산업용설비 등 거의 모든 기기에 스위칭 소자가 보급되어 실용화 되고 있다. 이와 같은 전력전자소자는 기기의 효율화 및 서비스의 품질향상 등과 같은 장점을 가지고 있지만 전력계통으로 고조파를 방출하는 단점을 가지고 있다[1].

고조파(Harmonics)는 부하에 따라 오븐, 히터와 같이 열을 발생시키는 것이 주된 기능인 부하에는 큰 영향이 없으나, 통신설비, 데이터 처리설비 등과 같이 깨끗한 정현파를 기본 입력으로 요구하는 부하에는 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 고조파에 의한 영향을 방지하기 위하여 IEEE, IEC 등에서 고조파 관리기준을 제안하였고[2-3] 한국전력에서는 배전계통 고조파 관리기준을 제정하여 계통운영에 적용하고 있다.

고조파 관리기준을 충족시키기 위해서는 수용가의 부하 특성에 따라 고조파 저감장치를 설치해야 하고 이로 인한 투자비와 설치공간이 증가하게 된다[4].

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 변압기 자체적으로 고조파를 저감할 수 있는 결선방식을 제안하였다.

2. 본 론

2.1 고조파 저감기술

고조파 저감장치의 종류에는 수동필터, 동조필터, 능동필터, ZED(Zero Eliminator Device), 위상조정 변압기(Phase

Compensating Transformer), 이중 Zig-Zag 결선 변압기 등이 있다.

수동필터, 동조필터, 능동필터, ZED는 기존의 수전설비 추가적으로 시설해야 하므로 투자비와 설치공간의 증가가 발생하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 이중 Zig-Zag 결선방식을 이용해 영상분 고조파와 역상분 고조파를 감소시키는 변압기가 개발 되었다.

이중 Zig-Zag 결선방식을 이용한 변압기를 사용할 경우 영상분 고조파의 감소가 가능하나 1차측과 2차측의 전압 위상차가 고정되어 특정 차수의 역상분 고조파만 감소시킬 수 있다[4].

본 논문에서 제안한 결선방식은 ZED와 위상조정 변압기의 원리를 이용한 것으로 변압기를 이용하여 고조파를 저감시켜 투자비와 설치공간의 증가가 없다. 또한 모든 차수의 영상분 고조파의 저감이 가능하며, 1차측과 2차측 전압의 위상조정이 가능하여 특정 차수가 아닌 모든 역상분 고조파 감소가 가능하다.

2.1.1 ZED(Zero Eliminator Device)

영상고조파 전류 저감장치인 ZED는 그림 1과 같이 철심에 권선을 반대방향으로 감아 영상분 전류의 위상을 상호 반대로 하여 상쇄되게 하였으며, 정상 및 역상분 전류는 벡터합성이 되도록 하였다[5]. 따라서 영상분 고조파에 대해서만 감소된다.

2.1.2 위상조정 변압기

위상조정 변압기의 위상을 15[°]로 하면 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 다음과정에 의해 제11고조파가 저감된다.

기본파전압 $V_1[V]$ 과 제11고조파 전류 $I_{11}[A]$ 사이에 위상차 $\theta_{11}[°]$ 가 있다고 가정한다. 부하 A의 2차측 전압 위상은 1차측보다 15[°]뒤지고, 전류 $I_{A,511}$ 는 15[°]×11=165[°] 위상이

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Hong-ik University, Korea
E-mail : parkjy@hongik.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Hong-ik University, Korea
Received : April 8, 2014; Accepted : June 19, 2014

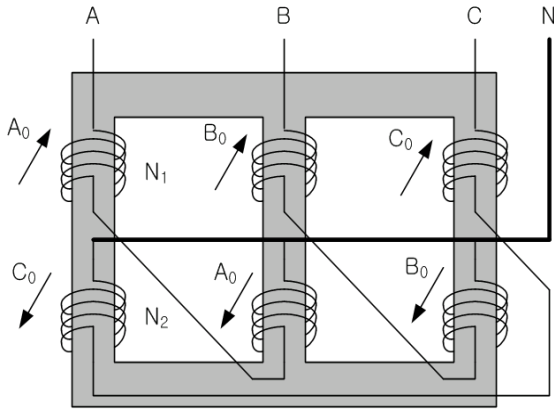


그림 1 ZED의 영상분 고조파 제거
Fig. 1 Zero-sequence harmonics elimination of ZED

뒤져 흐른다. 위상조정변압기 1차측은 15[°]만큼 위상이 더해져서 전압은 부하모선의 전압과 동위상이고, 전류 I_{A11} [A]은 역상전류이므로 부하 B의 전류 I_{B11} 과 크기는 같고, 위상은 180[°]차이가 나게 된다. 따라서 부하 모선에 흘러 들어오는 제11고조파 전류의 합 $I_{\Sigma 11}$ [A]은 0이 되어 제11고조파 전류가 제거된다[6].

$$I_{\Sigma 11} = I_{A11} + I_{B11} = 0 \quad (1)$$

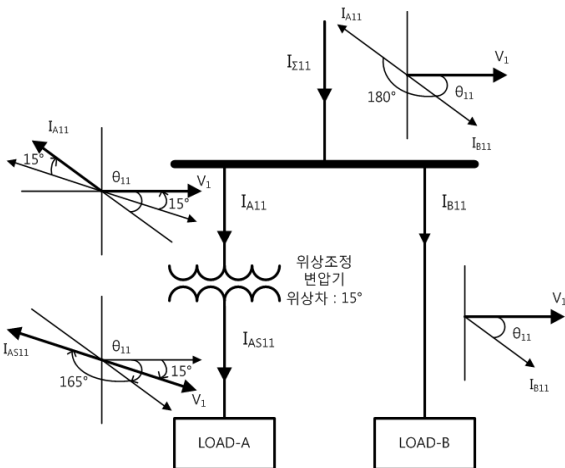


그림 2 위상조정변압기를 이용한 고조파 제거
Fig. 2 Harmonic elimination using a PCT

2.1.3 Zig-Zag 결선 변압기

이중 Zig-Zag 결선 변압기기는 그림 3과 같이 Zig-Zag 결선을 반복하여 철심에 권취한 형태이다. 이와 같이 구성할 경우 영상분 자속이 상쇄되어 고조파가 감소하게 된다[6].

그림 3과 같이 권선을 구성할 경우 1차측과 2차측 전압은 30[°]의 위상차를 가진다. 따라서 1차측과 2차측의 전압 위상차가 0[°]인 변압기가 함께 존재할 경우 제 5차, 7차 17차 등의 역상분 고조파를 감소시킬 수 있다.

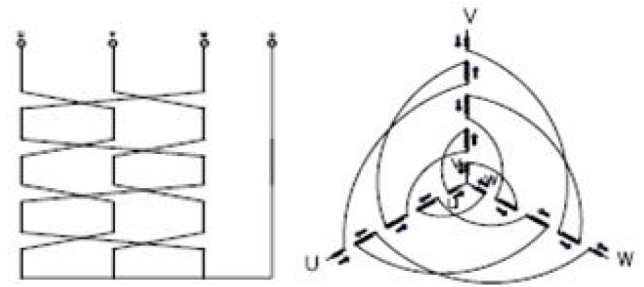


그림 3 Zig-Zag 결선 변압기
Fig. 3 Power Transformer by Zig-Zag Winding

2.2 고조파 제거를 위한 변압기 결선방식

2.2.1 변압기 결선방식

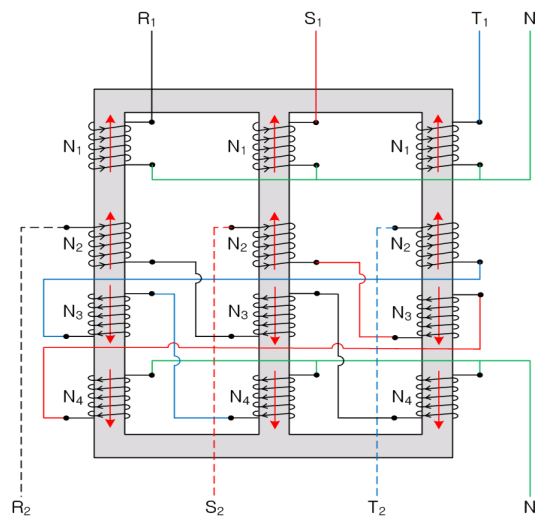


그림 4 변압기 결선방식
Fig. 4 Winding Method of Transformer

본 논문에서 제안하는 변압기 결선방식은 그림 3과 같다. 여기서 R_1, S_1, T_1 은 1차측 상전압, R_2, S_2, T_2 는 2차측 상전압을 나타내고 N 은 중성선, $N_1 \sim N_4$ 는 각 코일 권수를 나타낸다.

2.2.2 권수비를 이용한 영상분 고조파 제거

본 결선방식은 철심에 2차 권선을 구성하고 이와 반대로 3차 권선과 4차 권선을 구성하였다. 이 때 영상분 고조파를 상쇄시키는 N_2, N_3, N_4 의 권수비는 식 2와 같아야한다.

$$N_2 - N_3 - N_4 = 0 \quad (2)$$

2.2.3 권수비를 이용한 위상조정

2.1.2절에서와 같이 1차측과 2차측의 전압 위상차가 0[°]인 변압기와 1차측과 2차측 전압 위상차가 -15[°]인 변압기가 함께 있을 때 제11고조파와 제13고조파 등이 제거되고,

-30° 일 때 제5고조파, 제7고조파, 제17고조파 등이 저감된다[6]. 즉, 변압기 1차측 전압과 2차측 전압의 위상차를 원하는 값으로 조절이 가능할 경우 역상분 고조파의 저감이 가능하다는 것이다.

본 논문에서 제안한 결선방식을 이용한 변압기의 1차측 상전압(R_1)과 2차측 상전압(R_2)을 벡터도로 나타내면 그림 5와 같고, 식 3과 같이 2차, 3차, 4차 권선의 비율을 조정함으로써 위상조정이 가능하다.

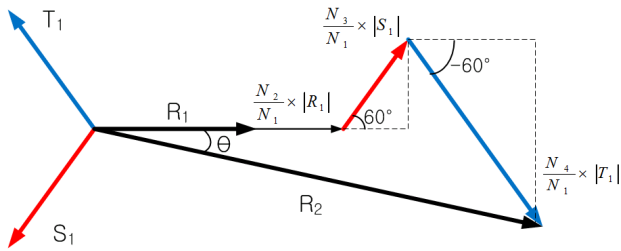


그림 5 전압 벡터도
Fig. 5 Voltage Vector diagram

$$\tan\theta = \frac{\frac{N_3}{N_1}|S_1| \cdot \sin 60 + \frac{N_4}{N_1}|T_1| \cdot \sin(-60)}{\frac{N_2}{N_1}|R_1| + \frac{N_3}{N_1}|S_1| \cdot \cos 60 + \frac{N_4}{N_1}|T_1| \cdot \cos(-60)} \quad (3)$$

2.2.4 영상분고조파 제거와 위상조정을 위한 권수비

제안한 결선방식을 이용해 변압기의 영상분 고조파와 역상분 고조파를 제거하기 위해 영상분 제거조건인 식 2와 위상조정 조건인 식 3을 연립방정식으로 구성하여 2차, 3차 4차 권선의 비율을 계산하였다.

2차측 권수가 1일 경우를 기준으로 전원측 상전압(R_1, S_1, T_1)과 부하측 상전압(R_2, S_2, T_2)의 위상차가 0°, -15°, -30°, -45°, -60° 가 되도록 3차 및 4차 권수비를 표 1에 나타냈다. 권수비가 양수일 경우 그림 4의 권선의 방향 같은 방향을 가지고 권수비가 음수일 경우 권선의 방향은 역방향이 된다.

1차측 권수는 영상분 고조파 제거조건과 위상차에 영향을 주지 않고, 식 4와 같이 전원측 상전압과 부하측 상전압의 비율(변압비)에 영향을 준다. 표 1에 나타낸 1차측 권수비는 변압비(a)가 1일 때의 값이다.

$$a = 1 = \frac{|R_1|}{|R_2|} = \frac{|R_1|}{\sqrt{(x)^2 + (y)^2}} \quad (4)$$

$$x = \frac{N_2}{N_1}|R_1| + \frac{N_4}{N_1}|T_1| \cdot \cos 60 + \frac{N_3}{N_1}|S_1| \cdot \cos(-60)$$

$$y = \frac{N_4}{N_1}|T_1| \cdot \sin 60 + \frac{N_3}{N_1}|S_1| \cdot \sin(-60)$$

2.3 결선방식을 이용한 고조파 제거 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 변압기 결선방식의 고조파 저감 성능을 입증하기 위해 그림 5와 같이 전원측에서 영상분 고조파

표 1 위상차와 권수비

Table 1 Phase difference and turn-ratio

$\frac{N}{\theta}$	N_1	N_2	N_3	N_4
0[°]	1.5	1	0.5	0.5
-15[°]	1.5529136	1	0.267949	0.732051
-30[°]	1.7320508	1	0	1
-45[°]	2.1213198	1	-0.366025	1.366025
-60[°]	3	1	-1	2

전압이 유입되는 경우와 부하측에서 영상분 고조파 전류와 역상분 고조파 전류가 유출되는 경우에 대해 분석하였다.

본 변압기 결선방식의 경우 모든 영상분과 역상분 고조파에 대해 저감 효과가 있으나 본 논문에서는 임의의 제3고조파와 제11고조파에 대한 시뮬레이션 결과만 나타냈다.

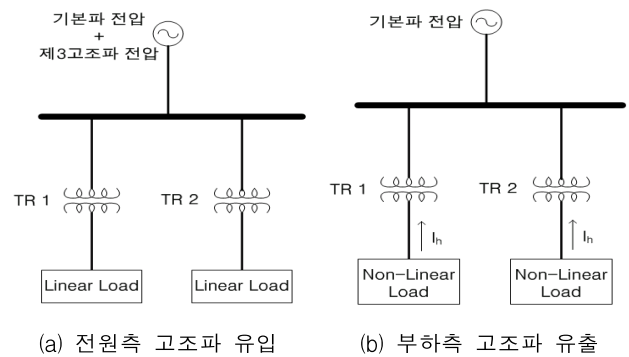


그림 6 고조파 시뮬레이션을 위한 계통도
Fig. 6 Power system diagram for Harmonics simulation

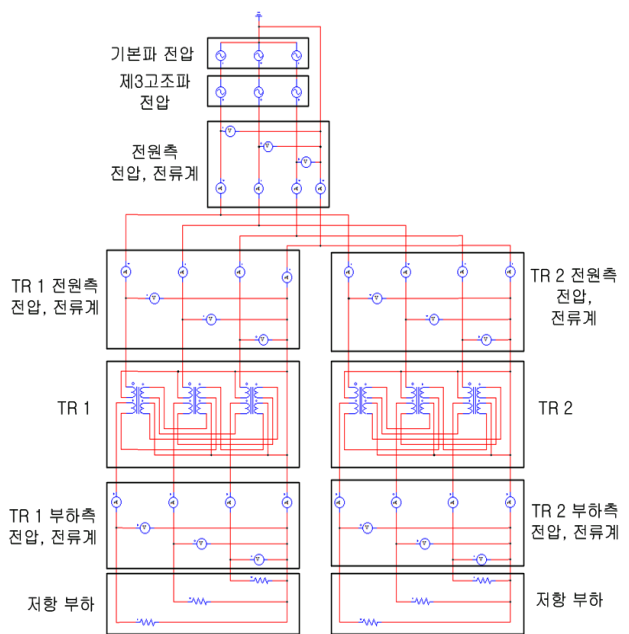
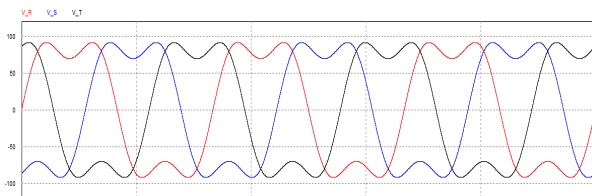


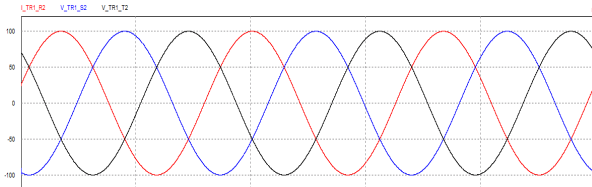
그림 7 전원측 제3고조파 시뮬레이션 회로도
Fig. 7 3th harmonic generated in the supply side Simulation circuit diagram

표 2 전원측 제3고조파 시뮬레이션을 위한 소자 입력값
Table 2 The data of device for Simulation in case of 3th harmonic generated in the supply side

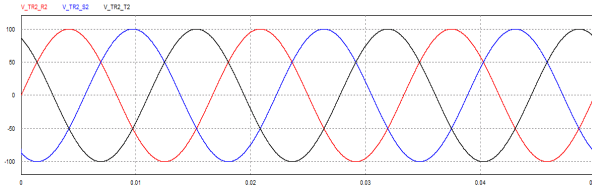
기본파 전압	전압	100[V _p]
	주파수	60[Hz]
제3고조파 전압(영상분)	전압	30[V _p]
	주파수	180[Hz]
	위상	0[°] (TR 1차측 R상 전압 기준)
변압기	권선 저항	1×10 ⁻⁸ [Ω]
	누설 인덕턴스	1×10 ⁻⁸ [H]
	자화 인덕턴스	1×10 ⁴ [H]
	TR 1의 권수비	θ = -15[°] 일 때 권수비 적용
	TR 2의 권수비	θ = 0[°] 일 때 권수비 적용
	변압비	1
부하	저항	2[Ω]



(a) 전원측 전압 파형



(b) TR 1 부하측 전압 파형



(c) TR 2 부하측 전압 파형

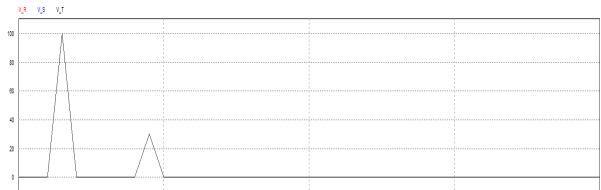
그림 8 전원측 제3고조파 유입시 시뮬레이션 결과
Fig. 8 Simulation result of 3th harmonic generated in the supply side

2.3.1 전원측에서 고조파전압이 유입되는 경우

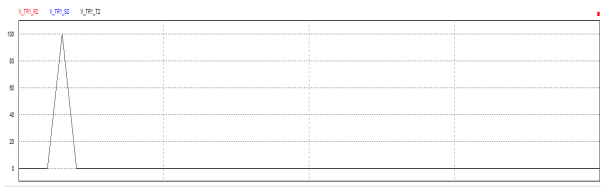
그림 6(a)의 계통도를 PSIM으로 시뮬레이션하기 위해 그림 7과 같이 회로도를 구성하였다. 회로도를 구성하는 전압원, 변압기, 부하 등의 입력값은 표 2와 같이 고조파의 저감 유무를 확인하기 용이하도록 선정하다.

그림 7의 회로도를 PSIM을 이용해 시뮬레이션한 결과 그림 8과 같이 전원측 전압은 기본파 전압과 제3고조파가 합성된 파형이 나타났고, 변압기 부하측에는 고조파가 제거된 기본파 전압 파형만 나타났다.

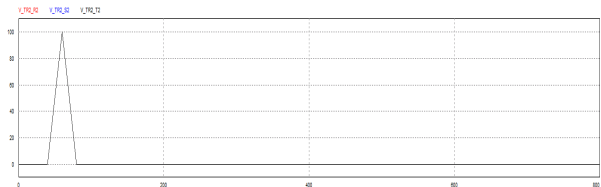
그림 9는 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 통해 각각의 전압 파형을 나타낸 것으로 주파수별 전압의 크기를 확실히 알 수 있다. 전원측 전압은 60[Hz]와 180[Hz]에 값이 나타나지만 TR1 부하측과 TR2 부하측에는 60[Hz]에만 값이 나타난다. 따라서 전원측에서 유입되는 영상분 고조파를 변압기 내부에서 완벽하게 제거하는 것을 확인할 수 있다.



(a) 전원측 전압 FFT



(b) TR 1 부하측 전압 FFT



(c) TR 2 부하측 전압 FFT

그림 9 전원측 제3고조파 유입시 FFT 분석결과
Fig. 9 FFT result of 3th harmonic generated in the supply side

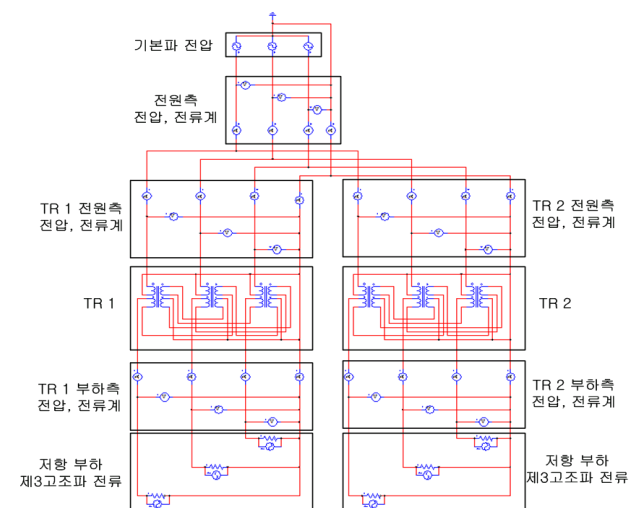


그림 10 부하측 제3고조파 전류 유출 시뮬레이션 회로도
Fig. 10 3th harmonic generated in the load side Simulation circuit diagram

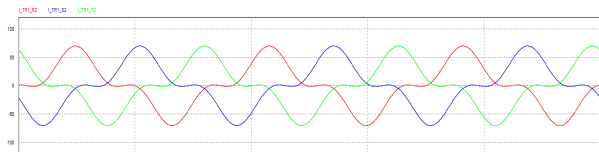
2.3.2 부하측에서 제3고조파 전류가 유출되는 경우

그림 6(b)와 같이 부하측에서 제3고조파 전류가 유출되는 경우에 대하여 시뮬레이션하기 위한 회로도도 그림 10과 같고, 소자의 입력값은 표 3과 같다.

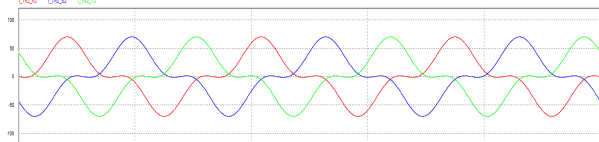
시뮬레이션 결과 그림 11과 같이 부하측 전류는 기본과

표 3 부하측 제3고조파 시뮬레이션을 위한 소자 입력값
Table 3 The data of device for Simulation in case of 3th harmonic generated in the load side

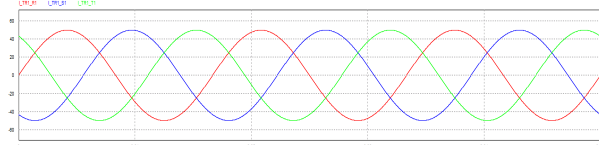
기본파 전압	전압	100[V _p]
	주파수	60[Hz]
변압기	권선 저항	1×10 ⁻⁸ [Ω]
	누설 인덕턴스	1×10 ⁻⁸ [H]
	자화 인덕턴스	1×10 ⁴ [H]
	TR 1의 권수비	θ = -15[°] 일 때 권수비 적용
	TR 2의 권수비	θ = 0[°] 일 때 권수비 적용
	변압비	1
부하	저항	2[Ω]
	전압	20[A _p]
제3고조파 전류(영상분)	주파수	180[Hz]
	위상	0[°]
		(TR 2차측 R상 전압 기준)



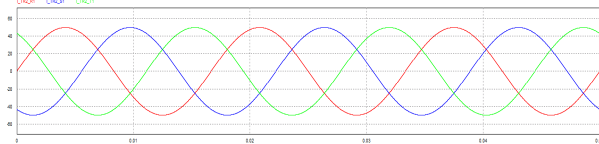
(a) TR 1 부하측 전류 파형



(b) TR 2 부하측 전류 파형



(c) TR 1 전원측 전류 파형

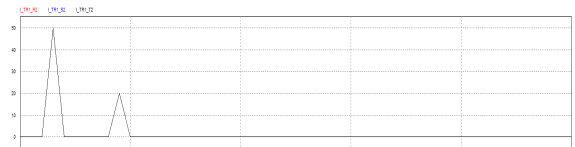


(d) TR 2 전원측 전류 파형

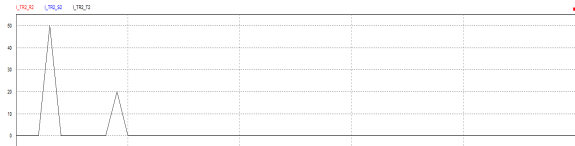
그림 11 부하측 제3고조파 유출시 시뮬레이션 결과
Fig. 11 Simulation result of 3th harmonic generated in the load side

전류와 제3고조파 전류가 합성된 파형이 나타났고, 변압기 전원측에는 고조파가 제거된 기본파 전류 파형만 나타났다.

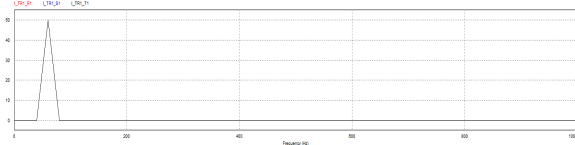
그림 12는 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 통해 각각의 전류 파형을 나타낸 것으로 주파수별 전압의 크기를 확실히 알 수 있다. 부하측 전류는 60[Hz]와 180[Hz]에 값이 나타나지만 전원측에는 60[Hz]에만 값이 나타난다. 따라서 부하측에서 영상분 고조파가 발생할 경우 변압기가 제거하여 전원측에 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있다.



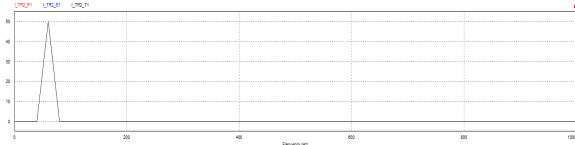
(a) TR 1 부하측 전류 FFT



(b) TR 2 부하측 전류 FFT



(c) TR 1 전원측 전류 FFT



(d) TR 2 전원측 전류 FFT

그림 12 부하측 제3고조파 유출시 FFT 분석결과
Fig. 12 FFT result of 3th harmonic generated in the load side

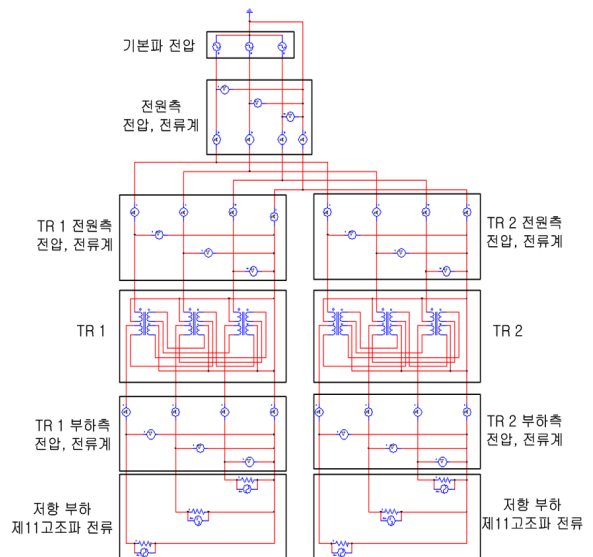


그림 13 부하측 제11고조파 유출 시뮬레이션 회로도
Fig. 13 11th harmonic generated in the load side Simulation circuit diagram

2.3.3 부하측에서 제11고조파 전류가 유출되는 경우

그림 6(b)와 같이 부하측에서 제11고조파 전류가 유출되는 경우에 대해 시뮬레이션하기 위한 회로도도 그림 13과 같고, 소자의 입력값은 표 4와 같다.

시뮬레이션 결과 그림 14와 같이 부하측 전류는 기본파 전류와 제11고조파 전류가 합성된 파형이 나타났고, 변압기 전원측에는 고조파가 제거된 기본파 전류 파형만 나타났다.

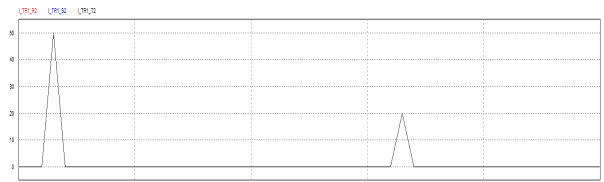
그림 15는 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 통해 각

표 4 부하측 제11고조파 시뮬레이션을 위한 소자 입력값

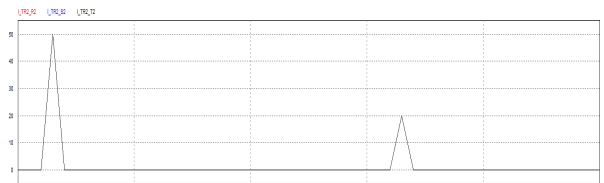
Table 4 The data of device for Simulation in case of 11th harmonic generated in the load side

기본파 전압	전압	100[V _p]
	주파수	60[Hz]
변압기	권선 저항	1×10 ⁻⁸ [Ω]
	누설 인덕턴스	1×10 ⁻⁸ [H]
	자화 인덕턴스	1×10 ⁴ [H]
	TR 1의 권수비	θ=-15[°]일 때 권수비 적용
	TR 2의 권수비	θ=0[°]일 때 권수비 적용
	변압비	1
부하	저항	2[Ω]
제11고조파 전류(역상분)	전압	20[A _p]
	주파수	660[Hz]
	위상	0[°] (TR 2차측 전압 기준)

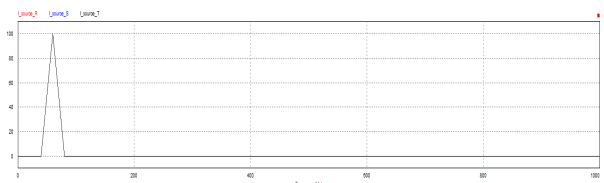
각의 전류 파형을 나타낸 것으로 부하측 전류는 60[Hz]와 660[Hz]에 값이 나타나지만 전원측에는 60[Hz]에만 값이 나타난다. 따라서 부하측에서 제11고조파가 발생할 경우 모션에서 서로 상쇄되어 전원측에 영향을 주지 않음을 확인할 수 있다.



(a) TR 1 부하측 전류 FFT



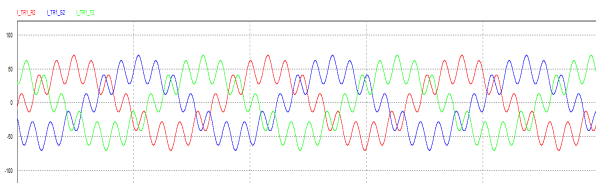
(b) TR 2 부하측 전류 FFT



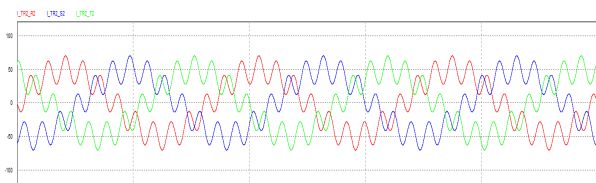
(c) 전원측 전류 FFT

그림 15 부하측 제11고조파 유출시 FFT 분석결과

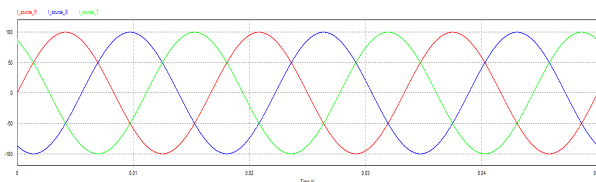
Fig. 15 FFT result of 11th harmonic generated in the load side



(a) TR 1 부하측 전류 파형



(b) TR 2 부하측 전류 파형



(c) 전원측 전류 파형

그림 14 부하측 제11고조파 유출시 시뮬레이션 결과

Fig. 14 Simulation result of 11th harmonic generated in the load side

3. 결 론

본 논문에서는 단상 4권선 변압기 3대를 이용해 영상분 고조파와 역상분 고조파를 제거할 수 있는 결선방식을 제안하고 PSIM을 이용해 전원측 고조파와 부하측 고조파에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

그 결과 전원측에서 제3고조파(영상분) 전압이 유입될 경우 변압기 내부에서 고조파 성분을 제거하여 부하측에 영향을 주지 않았다. 또한 부하측에서 제3고조파(영상분)와 제11고조파가 유출될 경우 변압기 내부에서 영상분 고조파가 제거되고, 모션에서 제11고조파가 상쇄되어 전원측에 영향을 주지 않았다.

이와 같이 변압기 자체적으로 고조파를 저감시키는 기술은 고조파 저감을 위해 고조파 저감장치를 시설하는 기존의 방식에 비해 공간의 활용성과 경제성을 향상시키는데 기여하는 바가 클 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 홍익대학교 교내연구비로 수행되었습니다.

References

- [1] Yong-Up Park, Seung-Hoon Choi, Joon-Soo Chang, "A Study on the Harmonic Current Characteristic and Emission Value Assess Method Considering the Linear Load" The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol 59, No 1, pp33~39, 2010. 1
- [2] Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Standard 519, 1992.
- [3] Electromagnetic compatibility(EMS)-Part 3: Limits - Section 6 : Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems -Basic EMC publication, IEC61000-3-6, 2008
- [4] Hoon-Yang Park "A study on Power Transformer by Zig-Zag Winding switch Reduction of Harmonics and Phase Imbalance", Soongsil University master's thesis, 2010. 12.
- [5] Dae-Keun Jeon "A study on the harmonics reduction using phase shifting transformer in electric power distribution system" Institute of illuminating and electrical installation engineers", Hongik University master's thesis, pp.46, 2003. 6. 30.
- [6] Kyung-Chul Kim "A study on the harmonics reduction using phase shifting transformer in electric power distribution system" Institute of illuminating and electrical installation engineers" Vol 16 No 2, pp38~44 2002. 3

저 자 소 개



김 태 훈 (金 泰 勳)

1983년 7월 27일 생. 2008년 홍익대 전기공학과 졸업. 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재, 동 대학원 전기공학과 박사과정



박 준 열 (朴 俊 烈)

1950년 3월 20일 생. 1974년 서울대학교 졸업. 1977년 서울대학교 졸업(석사). 1987년 서울대학교 졸업(박사). 1988~1989년 City University(London) 객원교수. 현재 홍익대학교 전자전기공학부 교수