

중성선 영상고조파 저감용 특수 Reactor 최적설계 연구

(An Analysis and Optimum Design of a Neutral Line Harmonics Eliminating Reactor)

신판석* · 정교범 · 김한돌 · 김 철

(Pan-Seok Shin · Gyo-Bum Chung · Han-Deul Kim · Cheol Kim)

요 약

근래의 전력계통에서는 스위칭 컨트롤러, 반도체 전력변환 설비, 사무 자동화 기기, PC 등으로 인하여 중성선에 많은 양의 영상 고조파가 발생하게 된다. 이러한 중성선 영상 고조파 전류를 줄이기 위하여 리액터의 일종인 NHER (Neutral-line Harmonics Eliminating Reactor)를 설계하고 해석하는 연구를 수행하였다. C++프로그램을 활용하여 NHER의 설계프로그램을 개발하였고, 설계프로그램을 확인하기 위해 380/220[V], 200[A]의 모델을 적용하여 설계 및 해석하였다.

최적화 설계 결과 철손이 26[%] 저감되었고, 특히 9 고조파는 다른 고조파에 비하여 크게 감소하였다. NHER을 설계할 때에는 실제 적용되는 부하의 영상고조파나 효율 등을 고려하면 더 좋은 결과가 나올 것이다.

Abstract

In the modern power distribution systems, there are lots of zero-phase current harmonics in the neutral power line due to much usages of the controlled switching devices, various semiconductor power converting systems, OA(Office Automation) equipments, PC etc. In order to minimize the current harmonics a zero-phase neutral line current eliminating reactor (NHER) is designed and analyzed its performance using the finite element program. For the design of NHER, a program is developed using C++ program. To verify the program a case model(380/220[V], 200[A]) is designed and analyzed by the developed program.

As the results of the optimal design, the core loss is reduced by 26[%] with eliminating of the current harmonics. Especially the ninth harmonics is much reduced as compared with the others. When the design of NHER is adapted to the load of the power system, the eliminating effect and efficiency of the device will be much better

Key Words : NHER, Harmonics, Zig-zag transformer, Finite Element Method, Sensitivity algorithm

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-860-2593, Fax : 041-863-7605

E-mail : pssshin@hongik.ac.kr
접수일자 : 2005년 12월 30일
1차심사 : 2006년 1월 3일, 2차심사 : 2006년 2월 16일
심사완료 : 2006년 2월 27일

1. 서 론

현대산업의 전력계통의 특성은 부하단에서 반도체 전력변환 설비, 제어장치, OA기기나 PC 등의 많은 이용으로 기존의 전력기기들이 대부분 비선형 특

성영역에서 운전되므로 중성선에 영상 고조파가 많이 흐르게 된다. 이런 중성선 영상 고조파에 의해 전선 측에 전압의 왜형이 발생하여 계통내의 다른 설비까지 악영향을 미치며, 무효전력의 증가로 역률까지 저하되는 등 전력품질 상에 문제를 발생시킬 뿐만 아니라 부하의 기기들에도 좋지 않는 영향을 미친다[1]. 이러한 중성선 영상 고조파 전류를 줄이기 위해서 리액터의 일종인 중성선 영상고조파 저감용 리액터(NHER: Neutral-line Harmonics Eliminating Reactor)를 설계하고 해석하는 연구를 수행하였다. 이 장치는 미국이나 유럽 등에서 이미 유사하게 개발되어 사용 중이며, 일명 ZED(Zero Harmonics Eliminating Device) 또는 Zig-zag 변압기라고도 한다. 3상 4선식 배전계통에 사용되는 이 NHER은 3상 코어의 3개의 leg에 권선이 Zig-zag 방식으로 걸선되어서 영상 고조파 전류에 의한 자속이 상호 상쇄되어 고조파성분이 제거되도록 설계되어 있다. NHER을 설계하는 알고리즘을 개발하고, 유한요소 프로그램인 Flux2D를 이용하여 특성을 해석하고, 최적설계를 위하여 누설리액턴스의 저감, 코어 및 동손의 저감, 효율의 향상 등을 위하여 다양한 권선법에 따른 중성선 영상 고조파 전류 저감 효과를 비교 분석하고 최적설계안을 제시하였다.

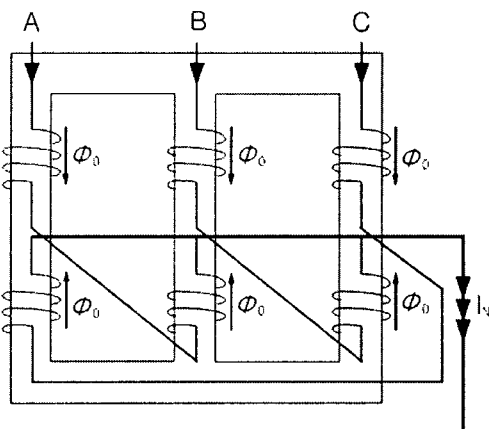


그림 1. NHER의 원리개념도
Fig. 1. Schematic diagram of NHER

그림 1은 3상 4선식 배전계통에서 영상고조파전류 저감을 위한 특수리액터의 하나인 NHER변압기의

원리를 보여주고 있다. 그림과 같은 철심에 A, B 및 C상별로 2개의 권선을 반대방향으로 권선하면, 영상 전류 크기는 각 상이 동일하므로 위상을 상호반대로 하여 자속이 상쇄되도록 하였으며, 정상분과 역상분 전류는 벡터적으로 합성될 수 있도록 한 것이다. 즉 영상임피던스는 작게 하여 영상분 전류가 이 장치로 잘 유입되도록 유도하고 정상분과 역상분 임피던스는 크게 하여 정상분과 역상분의 전류가 NHER 변압기 내로 많이 흐르지 않도록 하는 원리이다.

2. 고조파저감용 특수 리액터(NHER)의 설계

2.1 NHER의 코어설계

NHER의 설계를 위해서 B-H커브, 코어의 단면적, 턴수 등을 결정해야 한다. 용량이나 설치 위치에 따라서 코어의 크기 형상 등이 달라질 수 있다. 코어의 재질 크기, 형상, 코일의 굵기, 턴수 등을 계산하는 프로그램을 개발하여 코어의 크기, 형상, 턴수 등을 결정한다.

첫 번째로 가상의 1 turn당 전압 V/T 을 아래 공식을 이용하여 구한다.

$$V/T = \sqrt{P/3} \times C [V/T] \quad (1)$$

여기서 $P = 1/\sqrt{3} \times V_{LtoL} \times I_N [VA]$, V_{LtoL} 는 선간 전압 [V], I_N 는 중성선 전류 [A], C 는 자기장하와 전기장하의 몫을 배분하는 정수이다. 가상의 V/T 에서 권회수를 구하면 다음과 같다.

$$n = V \times (V/T)^{-1} \text{ (단 } n \text{은 자연수이다.)}$$

V 는 상전압으로 실제 V/T 는 다음과 같다.

$$V/T_{Real} = \frac{E}{n} [V/T] \quad (2)$$

E 는 실효치 전압으로 코일의 권회수를 n 으로 할 때의 실효치 전압은 다음과 같다.

$$E = 4.44 \times f \times n \times B \times Q \times 10^{-4} \quad (3)$$

여기서 f 는 입력주파수[Hz], B 는 코어의 자속밀도[T], Q 는 코어의 단면적[cm²]이고, 식을 Q 에 대해서 정리하면 아래와 같다.

$$Q = \frac{10^4}{4.44 \times f \times B} \times V / T_{Real} [cm^2] \quad (4)$$

그러나 실제 코어의 단면적은 각종 고조파로 인한 와전류손을 줄이기 위해서 K-Factor와 절연피막, 철심이 완전히 밀착되지 않기 때문에 적층율을 고려해야 한다.

2.2 NHER의 코일 설계

코일은 zig코일과 zag코일 사이에서 발생하는 와전류손과 누설을 줄이기 위해 그림 2와 같은 실린더형 권선 구조를 선택하는 것이 일반적이다.

코일 단면적 q 는

$$q = \frac{I_N}{3} \times \frac{1}{J} [mm^2] \quad (5)$$

J 는 전류밀도[A/mm²]이다. 그러나 실제 제작시 단면적은 전기용 연동선 특성표를 참조하여 선정하므로 계산 값보다 약간 클 수 있으므로 전류밀도도 다시 보정해 주어야 한다. 그림 2에서 동선의 가로 길이 a [mm]는 동선에 감는 절연피복지도 고려하여야 한다.

$$\alpha_{Real} = \alpha + 2 \times \Delta \times \eta + G [mm] \quad (6)$$

여기서 α_{Real} 는 절연피복지를 고려한 실제 가로 길이[mm], Δ 는 절연피복지의 두께[mm], η 는 절연피복지를 감는 턴 수, G 는 절연피복지를 감을 때 완전히 밀착되지 않기 때문에 주는 여유분이다. 실제 세로 길이도 동일하게 적용될 수 있다.

$$\beta_{Real} = \beta + 2 \times \Delta \times \eta + G [mm] \quad (7)$$

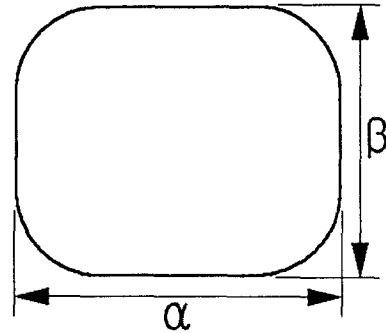


그림 2. 코일의 크기
Fig. 2. Coil size

코일 한쪽의 가로 길이는 다음과 같다.

$$d1 = \alpha_{Real} \times P_w \times F_l \times S [mm] \quad (8)$$

여기서 P_w 는 가로 병렬도체 수, F_l 는 코일의 층 수, S 는 Spring out을 고려한 상수이며, 1상의 코일이 양분되므로 $d1 = d2$ 이다. 코일의 세로 길이는 다음과 같다.

$$h = \beta_{Real} \times P_L \times \left(\frac{n}{F_l} + 1 \right) [mm] \quad (9)$$

여기서 P_L 는 세로 병렬도체 수이다.

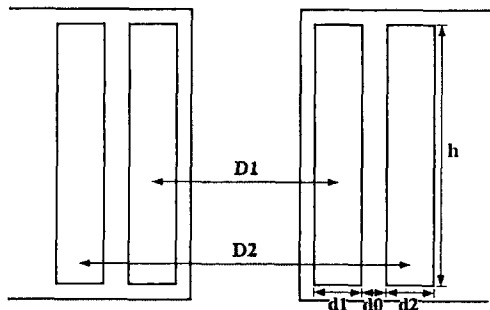


그림 3. 권선의 높이와 폭의 표시
Fig. 3. Coil height and width

따라서 코어의 윈도우 영역에서 B, C는 다음과 같다.

$$B = 2 \times dd + 3 \times Cd \text{ [mm]} \quad (10)$$

$$C = h + 2 \times \Delta_c + 2 \times Cd \text{ [mm]} \quad (11)$$

여기서 dd는 코일전체두께, C_d는 냉각덕트 길이 [mm], Δ_c는 실제 코일 제작시 고려되는 길이[mm]이다.

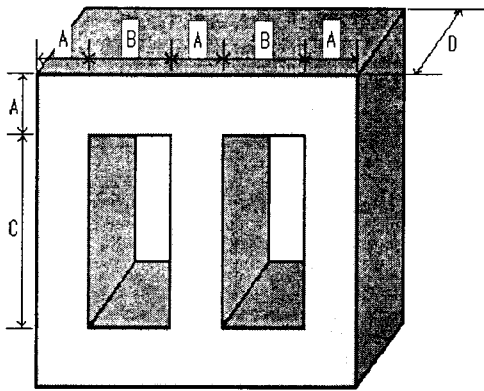


그림 4. NHER코어의 크기표시
Fig. 4. Description of NHER core

코일과 코어의 중량은 기하학적 형상과 밀도에 의해서 계산이 되고, 철손과 동손은 코어의 중량과 코일의 길이를 이용하여 계산이 가능하다. 누설 인덕턴스는 다음과 같다.

$$LI = \mu_0 \times \frac{l_m \times n^2}{h} \times (d0 + \frac{d1 + d2}{3}) \text{ [mH]} \quad (12)$$

여기서 μ₀는 자유공간에서의 투자율이고, l_m은 코일의 평균길이이다.

2.3 민감도기법을 이용한 NHER 코어 최적화

고조파저감용 특수리액터에서 철손은 히스테리시스 손과 와류손이므로 내부 자속밀도와 코어의 크기(무게)와 관계가 있다. 본 연구에서는 코어의 형상을 최적화하기 위하여 NHER 코어의 모서리 부분에 설

계변수를 9개 지정하고 자속밀도의 평균값(코어 중심에서의 값)을 목적함수로 정하고 모서리의 중심과 설계변수사이의 자속밀도 평균값을 계산하여 그 값이 평균치와 같아질 때까지 설계변수를 변화시키면서 형상을 찾아가는 방법으로 프로그램하였다. 따라서 목적함수를 다음과 같이 정의한다.

$$F = \sum_{i=1}^{nr} [B_i - B_0]^2 \quad (13)$$

여기서 nr은 자속밀도가 계산되는 총 위치 수, B_i는 코어의 i번째 위치에서의 자속밀도, B₀는 nr번의 코어 위치에서 자속밀도의 평균값이다. 위 식 (13)과 같이 초기형상의 목적함수 F₀를 구하기 위해서는 초기형상의 자속밀도평균값을 구해야 한다. 초기형상의 자속밀도 값은 그림에 표시된 선상에서의 위치별 자속밀도를 구하여 평균값 B₀을 구할 수 있다. 초기형상의 목적함수 값이 계산이 되면 각 node를 조금씩 이동하여 각 node의 목적함수 값을 계산하여야 한다. 각 node에서의 목적함수 값은 식 (13)과 같은 방법으로 계산되어 진다. 각 node의 목적 함수 값이 계산이 되면 각 node의 목적함수의 변화량 ΔF를 다음 식을 이용하여 쉽게 계산할 수 있다.

$$\frac{F_n - F_0}{\Delta P_i} = \frac{\Delta F}{\Delta P_i} \quad (14)$$

식 (14)에 의하여 목적함수의 변화량이 구해지면 각 절점의 변위계산은 다음 식에 의해서 계산할 수 있다.

$$\left| \frac{\Delta F}{\Delta P_i} \right|^2 = \sqrt{\left(\frac{\Delta F}{\Delta P_1} \right)^2 + \left(\frac{\Delta F}{\Delta P_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta F}{\Delta P_n} \right)^2} \quad (15)$$

$$P'_i = P_i + \alpha \cdot F \cdot \frac{\Delta F}{\Delta P_i} / \left| \frac{\Delta F}{\Delta P_i} \right|^2 \quad (16)$$

식 (16)의 P'_i는 변화된 설계변수의 길이이며, 반복하여 민감도의 오차가 일정한 범위이상일 때까지 계산한다[4].

그림 5는 민감도기법을 이용하여 최적설계를 위한

NHER의 코어와 코일의 해석모델이다. 점선으로 된 코어 외곽형상을 민감도 기법을 이용하여 최적화하기 위해서 윈도우 모서리 부분을 기준점으로 하여 그림과 같이 9개의 설계 변수를 지정하였다. 점 1번과 9번의 좌표는 변하지 않는다.

그림 6은 민감도 기법에 의해서 계산된 각 설계변수들의 이동으로 인한 코어의 변화를 보여주고 있다. 윈도우 모서리인 민감도기법 기준점을 0으로 하고, 점 2, 점 3, 점 4, 점 5, 점 6, 점 7 점 8들이 조금씩 점 0을 향해 이동한다. 기준점 0으로부터 최소 90[°] 이하로는 접근을 하지 않도록 제한사항을 두었다. 이는 설계 시에 코어의 단면적 기준을 90[°]×130[°]로 놓고 설계하였기 때문이다. 기준점부터 각 설계변수사이의 직선상의 평균 자속밀도를 구하여 그 값들이 기준점에서 점 1 또는 9의 평균 자속밀도와 같아지는 지점까지 설계변수들의 좌표를 계산하였다.

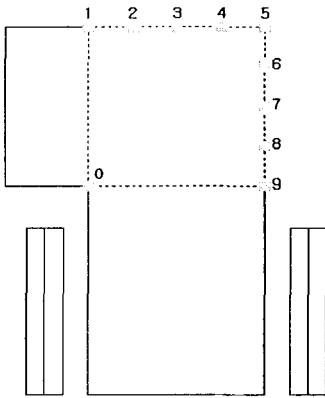


그림 5. 민감도 해석 모델
Fig. 5. Simulation model for sensitiy algorithm

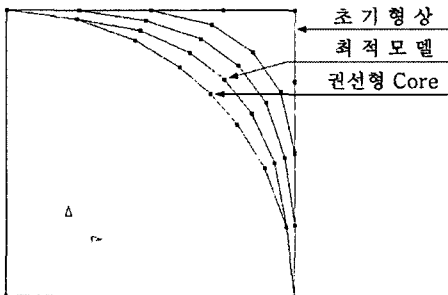


그림 6. 설계변수의 위치와 코어의 형상변화
Fig. 6. Positions of variable and core shapes

3. NHER의 동특성 해석

3.1 Flux2D를 이용한 Simulation

Case study로서 실제로 제작되어 사용된 모델과 개발된 프로그램의 결과 모델 및 중성선 전류 저감 및 효율향상을 위해서 개선된 모델을 시뮬레이션 하였다. 사양은 380/220[V], 200[A]이다. 상용프로그램인 Flux2D를 이용하여 시뮬레이션 하였으며, 객관적인 평가를 위해서 실측 데이터를 근거로 고조파 전류 부하와 상용 냉각압연 전기강판의 데이터를 이용하였다. Pspice를 이용하여 전력계통을 해석하고, NHER을 사용한 이전과 이후의 전류파형을 분석하여 그 효과를 관찰하였다. 중성선의 임피던스를 실험실에서 0.1[Ω]으로 가정을 하여 시뮬레이션을 하였으므로 실측값과 계산 값에 약간의 차이가 있을 수 있다.

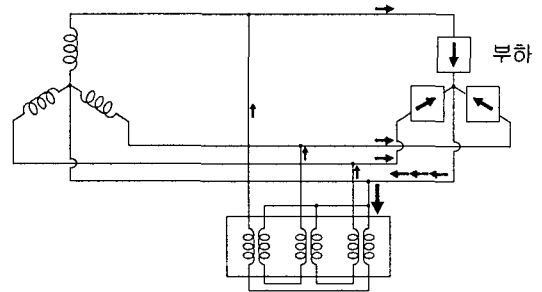


그림 7. NHER을 적용한 배전계통도
Fig. 7. Power distribution system diagram for application of NHER

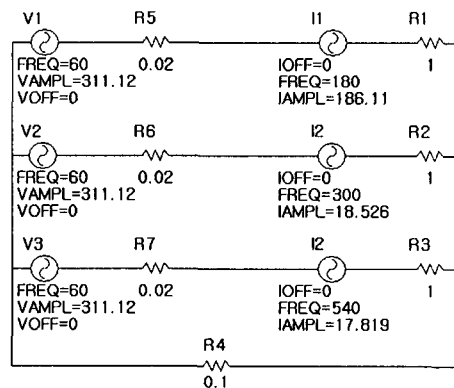


그림 8. Pspice 회로도
Fig. 8. Pspice circuit diagram

중성선 영상고조파 저감용 특수 Reactor 칩적설계 연구

그림 7은 전력계통 회로도이며, 그림 8에서의 회로를 상용 프로그램인 Pspice를 활용하여 NHER의 설치전의 중성선 전류를 해석하였다. 그림 7의 부하에서 각상에 각각 주파수와 전류량이 다른 전류원으로 Pspice에 입력하였다.

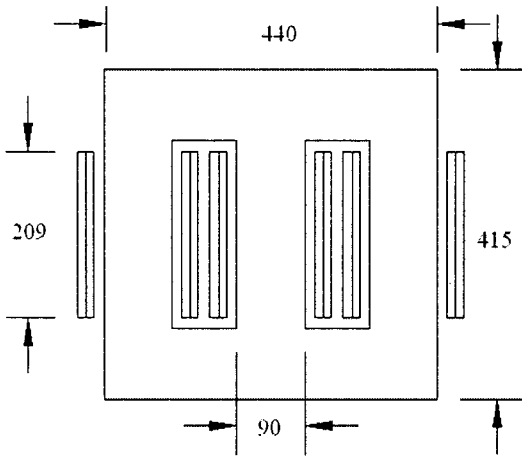


그림 9. NHER의 해석모델 (200[A], 단위 : [mm])
Fig. 9. Simulation model of NHER (200[A], length unit : [mm])

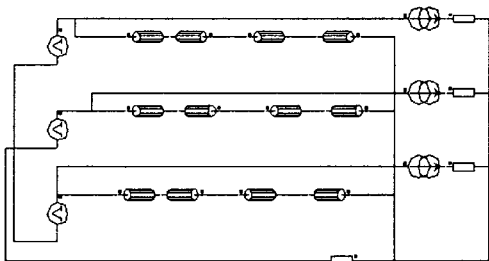


그림 10. Flux2D 외부회로도
Fig. 10. External circuit with Flux2D

그림 9 및 10은 FEM해석을 위한 Flux2D의 도면과 외부회로이다. 그림 9의 도면은 NHER의 설계 프로그램으로 계산한 값이고, 그림 10은 그림 8의 조건과 동일한 조건하에 Flux2D로 구현된 NHER의 회로이다. NHER의 입력 조건은 각 코일이 34턴, 각 코일의 DC저항은 0.02[Ω]으로 입력하여 해석하였다.

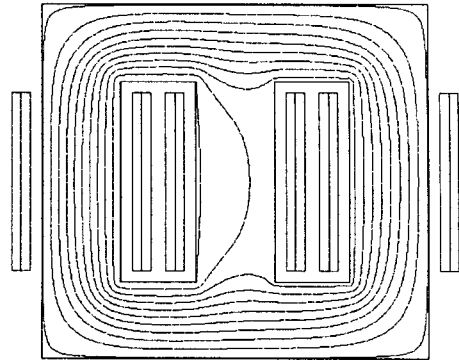
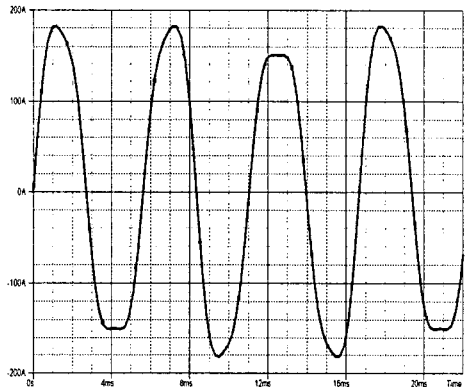
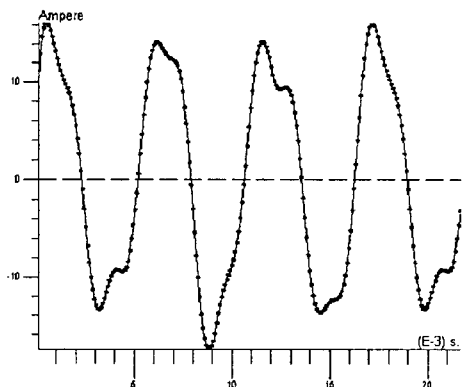


그림 11. NHER의 등자속선
Fig. 11. Equiflux lines of NHER



(a) Pspice 전류파형
(a) Current wave from Pspice



(b) Flux2D 전류파형
(b) Current wave from FLUX2D

그림 12. 중성선 전류파형
Fig. 12. Neutral line current wave forms

그림 11은 Flux2D의 해석결과에 예로 등자속선을 보여주고 있다.

그림 12의 (a)는 계통을 표현한 Pspice의 중성선 전류 파형이다. 많은 양의 고조파 전류가 흐르는 것을 확인할 수 있다. 그림 12의 (b)는 Flux2D를 이용하여 NHER을 계통에 설치하였을 때 중성선에 흐르는 전류를 계산한 것이다.

그림 13은 그림 12 (a)의 전류파형을 푸리에 변환한 그래프이다. 3차(180[Hz])에 187.0[A], 5차(300 [Hz])에 18.6[A], 9차(540[Hz])에 17.5[A]이다.

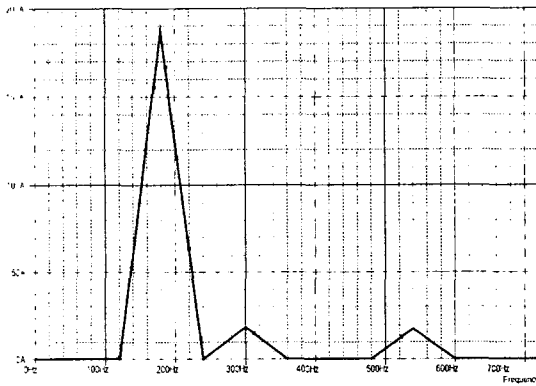


그림 13. Pspice 전류파형의 푸리에 변환
Fig. 13. Fast Fourier Transform of current wave from Pspice

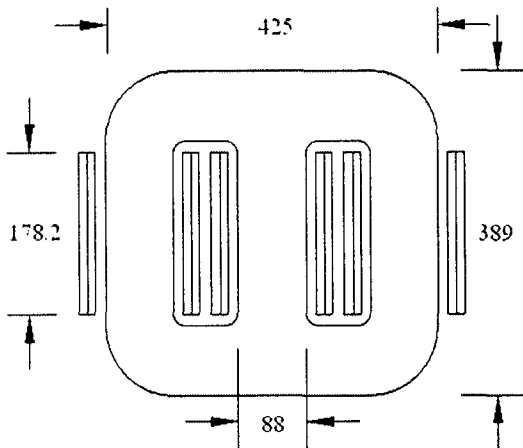


그림 14. 권선형 코어의 NHER 시뮬레이션 모델
(단위 : [mm])
Fig. 14. Simulation model of winding case typy NHER(length unit : [mm])

이러한 계산 결과를 이용하여 기존의 NHER을 최적화한 model을 재설계하였다. 그림 14는 재설계된 NHER의 코어로 폭은 425[mm]이고, 높이는 398[mm]이며, 깊이는 127[mm]이다. 그림 10과 같은 회로에 권선수는 34턴이고 코일 평균저항을 약 0.019으로 하는 모델이며, Pspice와 동일한 부하조건으로 simulation 하였다.

3.2 동특성 해석 결과

그림 15는 계통에 기존의 NHER을 적용하여 중성선 전류를 계산한 결과 파형과 최적화한 모델을 계통에 적용한 시뮬레이션 결과 파형을 비교 분석한 그래프이다. 중성선 전류를 22[ms]까지의 시간에 따른 해석을 하였다. 시뮬레이션 결과, 중성선에 흐르는 전류가 저감된 것을 확인하였다. 실제 현장에선 실험에서 다른 제3, 5, 9차 고조파 이외에도 많은 고조파가 존재하고 중성선 임피던스가 더 낮을 수도 있기 때문에 작은 부분 차이가 있을 수 있다. 시뮬레이션에서는 제3, 5, 9차 고조파를 주로 다루었다. 자체설계의 경우 이전의 NHER보다 성능이 약 8[%] 정도 향상된 것을 확인할 수 있었다(표 1 참조). 표 1은 각 NHER의 모델에 따른 고조파 저감 효율에 대하여 비교한 것이다.

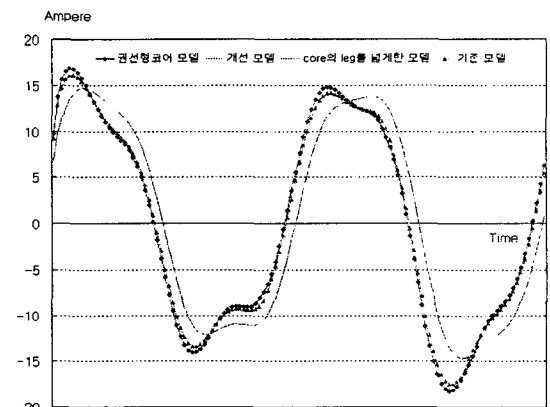


그림 15. 중성선 전류의 파형
Fig. 15. Current wave forms of the neutral line

그림 16은 중성선 전류의 고조파를 분석한 것이다.

Core의 leg를 넓게 한 모델에서 제3차 고조파가 0.4[%], 제5차는 9.0[%], 제9차는 23.9[%]의 저감효율이 향상된 것을 확인할 수 있었다. 제9고조파는 다른 차수의 고조파 보다 더 많이 저감된 것을 확인할 수 있다. 이것은 최적 NHER의 설계 시 K-Factor를 이용하여 9차고조파를 고려한 설계를 하였기 때문이다.

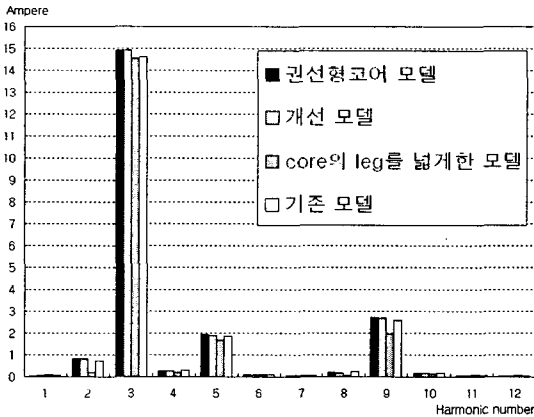


그림 16. 중성선 전류의 고조파 스펙트럼 분석
Fig. 16. Spectrum analysis of line current harmonics

표 1. 고조파 저감 효율 변화
Table 1. Efficiency variation of Decrease

Model	권선형코어	개선	Leg 개선	기존
합 계	251	259	194	265
증감률[%]	-2.84	-2.87	8.3	0

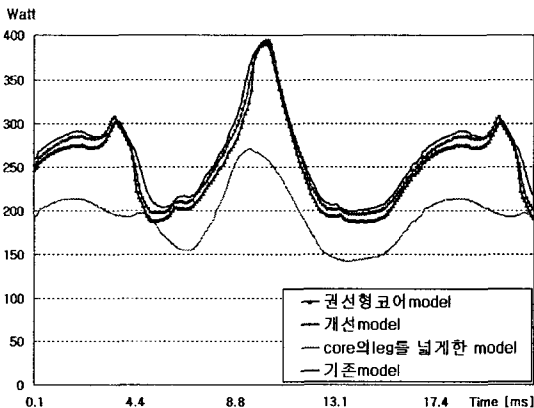


그림 17. NHER의 철손파형
Fig. 17. Iron loss wave from NHER

그림 17은 철손의 파형을 분석한 그림이고, 표 2는 각 모델의 평균 손실을 계산한 결과이다. Core의 leg를 넓게 한 모델에서 중성선 고조파 전류에 의한 손실이 26.5[%]정도 감소를 보여주고 있다. 기존의 모델에 비해서 철손이 작으며, 따라서 열에 민감한 장소에서 사용이 유리할 것으로 예상된다.

표 2. 평균손실
Table 2. Average loss

Model	권선형코어	개선	Leg 개선	기존
평균손실 [W]	251	259	194	265

4. 결 론

본 논문에서는 개발한 코어 및 턴수 등을 계산하는 프로그램을 이용하여 중성선 고조파저감용 Reactor(NHER)를 설계하였다[2]. 이를 계통해석과 최적화를 통해 효율을 높이고 최적설계를 하였다. 시뮬레이션을 통해서 중성선 전류의 저감 효율을 높이고 코어손실을 저감하는 것을 목표로 하는 최적 설계안을 도출하였으며 기존 모델은 380/220[V], 200[A] NHER이었다. 최적 설계 결과 고조파저감 효과와 함께 약 26[%]의 철손이 저감되어 효율이 향상되는 모델을 제안하였다. 본 연구에서 제시한 모델은 영상고조파는 물론 모든 고조파에서 좋은 성능을 보이지만 특히 제9고조파는 기존 모델에서 보다 더 많이 저감되었다. 부하에 따라 그에 맞는 모델을 설계하여 사용할 때 더욱 효과를 볼 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 2003년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력선행기술(R2003-B-361)에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] Chang-Won Kang, "The development of a neutral zero-sequence current harmonics eliminating device in electric power distribution systems", Master's Thesis, Hong-Ik University, February 2002.
- [2] Chul Kim, Han-soo Kim, Han-deul Kim, Pan-Seok Shin, "A Design and Analysis of a Neutral Line Harmonics Eliminating Reactor", Proceedings of the KIEE EMECS autumn annual Conference 2004, pp. 52-54, October.
- [3] William MFlanagan, "Handbook of transformer design & applications", McGraw-Hill, Inc. pp. 7.16-7.44, 1992.
- [4] Hyuk-Jin Song and Pan-Seok Shin, " Shape Optimization for Stator Pole of Universal Motor using FEM and Evolution Strategy", Proceeding of the Compumag Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, pp. 192-193, November 1999.

◇ 저자소개 ◇

신판석 (申判錫)

1953년 1월 28일생. 1977년 서울대학교 공과대학 졸업. 1986년 R.P.I. 전기공학 석사. 1989년 R.P.I. 전기공학박사. 1980~1993년 한국전기연구원 선임 연구원. 1993년~현재 홍익대학교 전기공학과 교수

정교범 (鄭敎範)

1959년 12월 20일생. 1983년 서울대학교 공대 전기공학과 졸업(학사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 Univ. of Florida(박사). 1992~1993년 Virginia Tech(Post Doc.). 1993~1995년 한국전기연구소 선임연구원. 2003년 U. of Florida 방문교수. 1995년~현재 홍익대학교 전자전기공학과 부교수.

김한들 (金한들)

1976년 4월 2일생. 2005년 전기공학과 졸업. 2005년 현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사 과정.

김 철 (金 澈)

1976년 5월 1일생. 2004년 전기공학과 졸업. 2004년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사 과정.