

중성선 영상고조파저감용 특수 Reactor 설계와 해석

김철, 김한들, 김한수, 신판석
홍익대학교 전기공학과

A Design and Analysis of a Neutral Line Harmonics Eliminating Reactor

Chul Kim, Han-Deul Kim, Han-soo Kim and Pan Seok Shin
Department of Electrical Engineering, Hongik University

Abstract - 현대정보화산업에서 배전계통의 부하는 첨단 제어장치, 다양한 반도체 전력변환 설비, OA기기 및 PC 등의 사용으로 배전계통의 중성선에 영상 고조파가 많이 발생한다. 이것을 최소화하기 위해서 본 연구에서는 중성선의 영상전류를 제거하는 장치인 특수 리액터를 설계하고 유한요소프로그램(Flux2D)을 이용하여 특성을 해석하여 검증하였다. 최적설계를 위하여 누설자속의 최소화, 코어 및 동손의 최소화를 위한 설계알고리즘도 구성하여 최적설계안을 제안하였다.

여기서, $P = \frac{1}{\sqrt{3}} \times V_s \times I_N \times [VA]$, V_s 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.

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

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

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

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

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

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

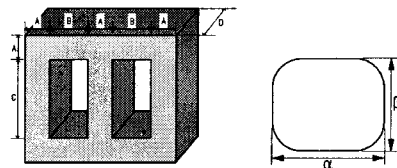


그림 1. 코어의 크기표시 그림 2. 코일의 크기

1. 서 론

현대산업의 전력계통의 특성은 부하단에서 반도체 전력변환 설비, 제어장치, OA기기나 PC 등의 많은 이용으로 기존의 전력기들이 대부분 비선형 특성영역에서 운전되므로 중성선에 영상 고조파가 많이 흐르게 된다. 이런 중성선 영상 고조파에 의해 전원측에 전압의 왜형이 발생하여 계통내의 다른 설비까지 악영향을 미치며, 무효전력의 증가로 역률까지 저하되는 등 전력품질 상에 문제를 발생시킬 뿐만 아니라 부하의 기기들에도 좋지 않은 영향을 미친다. 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 유럽등에서 이미 유사하게 개발되어 사용 중이며, 일명 ZED(Zero harmonics Eliminating Device)또는 Zig-Zag 변압기라고도 한다. 3상4선식 배전계통에 사용되는 이 NHER은 3상코어의 3개의 leg에 권선이 Zig-zag 방식으로 결선되어서 영상 고조파 전류에 의한 자속이 상호 상쇄되어 고조파성분이 제거되도록 설계되어 있다. NHER을 설계하는 알고리즘을 개발하고, 유한요소프로그램인 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.

2. 고조파저감용 특수리액터(NHER)의 설계

2.1 NHER의 코어설계

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

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

$$V/T = \sqrt{\frac{P}{3}} \times C [V/T] \tag{1}$$

2.2 NHER의 코일 설계

코일은 zig코일과 zag코일사이에서 발생되는 와류손과 누설을 줄이기 위해 그림 2와 같은 실린더형 권선 구조를 선택하는 것이 일반적이다.

코일 단면적 q_c

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

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

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

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

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

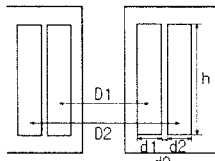


그림 3. 권선의 높이와 폭의 표시

코일 한쪽의 가로 길이 $d1$ 는 다음과 같다.

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

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

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

여기서, P_L 는 세로 병렬도체 수이다.

따라서, 코어의 윈도우 영역에서 B_c 는 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, dt 는 코일전체두께, Cd 는 냉각덕트 길이[mm], Δ_c 는 코일제작상 고려되는 길이[mm]이다. 코일과 코어의 중량은 기하학적 형상과 밀도에 의해서 계산이 되고, 철손과 동손은 코어의 중량과 코일의 길이를 이용하여 계산이 가능하다. 누설 인덕턴스는 다음과 같다.

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

여기서, μ_0 는 자유공간에서의 투자율이고, l_m 은 코일의 평균길이 이다.

3. NHER의 유한요소법에 의한 해석

3.1 Flux2D를 이용한 Simulation

Case study로서 실제로 제작되어 사용된 모델과 개발된 프로그램에 의해서 높은 중성선 전류 저감 및 효율

향상을 위해서 개선된 모델을 설계하여 simulation 하였다. 사양은 380/220V, 200A 이다. 상용프로그램인 Flux2D를 이용하여 simulation하였으며, 객관적인 평가를 위해서 실측 데이터를 근거로한 고조파 전류분해와 상용 냉각압연 전기강판의 데이터를 이용하였다. Pspice를 이용하여 전력계통을 해석하고, NHER을 사용한 이전과 이후의 전류파형을 분석하여 그 효과를 관찰하였다. 중성선의 임피던스를 실험실에서 0.1Ω으로 가정을 하여 시뮬레이션을 하였으므로 실측값과 계산값에 약간의 차이가 있을 수 있다.

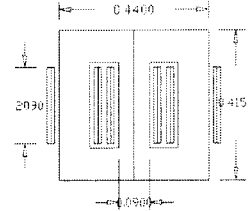


그림 4. 200A NHER의 simulation model

그림 5는 전력계통 회로도이며, 회로분석 프로그램인 Pspice를 이용하여 NHER 설치전의 중성선 전류를 분석하였다. 각상에 각각 주파수와 전류량이 다른 전류원을 부하로 하고 있다.

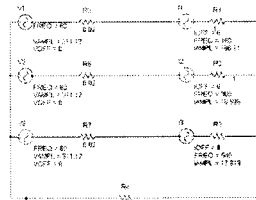


그림 5. Pspice 회로도

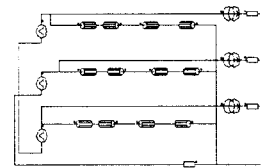


그림 6. Flux 외부회로도

모든 조건이 동일하고 Flux2D로 표현된 NHER이 병렬로 추가된 회로이다. 그림6은 FEM해석을 위한 Flux2D의 외부회로이다. 각 코일은 34턴이고 저항은 코일의 평균길이에 따른 DC저항이 약 0.02Ω인 NHER을 해석했다.

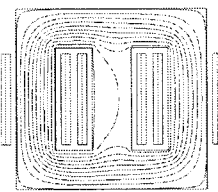
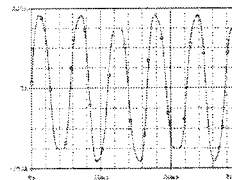
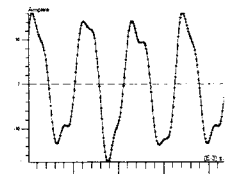


그림 7. NHER의 등자속선



(a) Pspice 전류파형



(b) Flux2D전류파형

그림 8. 중성선 전류파형

그림 8(a)는 계통을 표현한 Pspice의 중성선 전류 파형이다. 많은 양의 고조파 전류가 흐르는 것을 확인할

수 있다. 그림 8(b)는 NHER을 계통에 설치하였을 때 Flux2D를 이용하여 시뮬레이션한 중성선의 전류 파형이다. 중성선 전류가 저감된 것을 확인할 수 있었다. 이러한 계산결과를 이용하여 기존의 NHER을 최적화한 model을 설계하였다. 그림9는 설계된 NHER이다. 코어의 폭은 428.2mm이고 높이는 398.2mm이며, 깊이는 151mm이다.

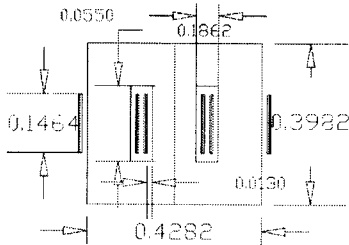


그림 9. NHER simulation model

그림 6의 회로를 이용하였으며 권선수는 21턴이고 코일 평균저항을 약 0.024Ω 으로 하는 모델이며, 동일한 부하조건으로 simulation 하였다.

3.2 해석 결과

그림 10은 계통에 기존의 NHER을 적용하여 중성선 전류를 계산한 것과 최적화한 모델을 계통에 적용한 것을 simulation 한 것으로 파형을 비교분석 하였다. 중성선 전류를 22ms까지의 시간에 따른 해석을 하였다. 시뮬레이션 결과 중성선에 흐르는 전류가 저감된 것으로 확인 되었다. 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.

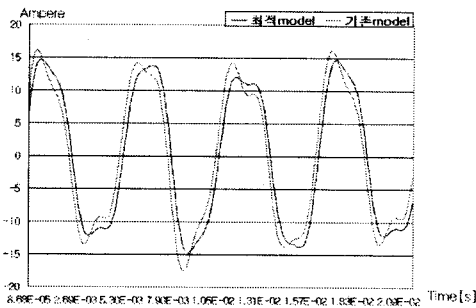


그림 10. 중성선 전류의 파형

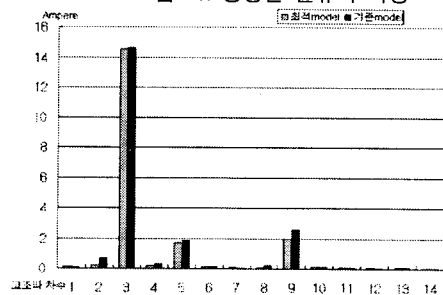


그림 11. 중성선 전류의 고조파 스펙트럼 분석

그림 11은 중성선 전류의 고조파를 분석한 것이다. 제3차 고조파가 0.4%, 제5차는 8.95%, 제9차는 23.9%의 저감효율이 향상된 것을 확인할 수 있었다. 제9고조파는 다른 차수의 고조파 보다 더 많이 저감된 것을 확인할 수 있다. 이것은 최적NHER의 설계시 K-Factor를 이용하여 9차고조파를 고려한 설계를 하였기 때문이다.

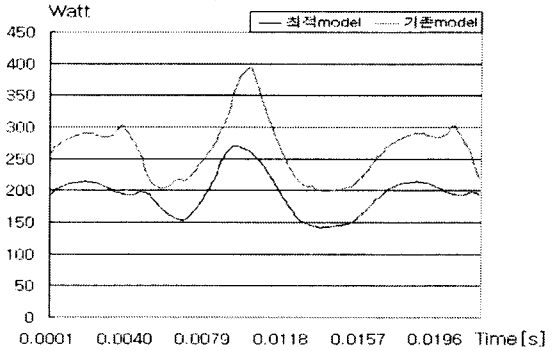


그림 12. NHER의 철손파형

(기존model손실: 256[W], 최적model손실: 194[W])

그림12는 철손의 파형을 분석한 그림이다. 최적설계한 코어에서 중성선 고조파 전류에 의한 손실이 약 26.5%정도 감소를 보여주고 있다. 기존의 모델에 비해서 철손과 동손이 작으며, 이 model은 또한 열에 민감한 장소에서 사용이 유리함을 예상할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 중성선 고조파저감용 Reactor (NHER)의 계통해석과 최적화를 통해 효율을 높이고 최적설계를 위한 코어 및 턴수 등을 계산하는 프로그램을 개발하였다. Simulation을 통해서 중성선 전류의 저감 효율을 높이고 코어손실을 저감하는 것을 목표로 하는 최적 설계안을 도출하였으며 기존model은 380/220V 200A NHER이었다. 최적 설계결과 고조파 저감 효과와 함께 약 26%의 철손이 저감되어 효율이 향상되는 model을 제안하였다. 본 연구에서 제시한 모델은 영상고조파는 물론 모든 고조파에서 좋은 성능을 보이지만 특히 제9고조파는 기존model에서 보다 더 많이 저감되었다. 부하에 따라 그에 맞는 model을 설계하여 사용할 때 더욱 효과를 볼 수 있을 것이다.

본 논문은 2003년도 전력산업연구개발사업으로 이루어졌음

[참 고 문 헌]

- [1] 강창원, "배전 계통에서의 중성선 영상고조파 전류 저감장치 개발", 석사학위 논문, 홍익대학교, 2002년 2월, pp. 36-57
- [2] William M.Flanagan, "Handbook of transformer design & applications", McGraw-Hill, Inc. pp. 7.16-7.44, 1992
- [3] "Method and apparatus for reducing the harmonic in alternating-current distribution networks." Universities Research Association Inc. USA (미국특허)