

대전력용 상분리 모선의 전자계 현상 수치해석

김진수 하덕용 최승길 강형부
한양대학교 전기공학과 한양대학교 전자전기공학부

Numerical Analysis on the Electromagnetic Phenomena in High Power Isolated Phase Bus

Jin-Soo Kim, Duk-Yong Ha, Seung-Kil Choi, Hyung-Boo Kang
Dept. of Electrical Eng. Hanyang Univ Division of Electrical and Computer Eng. Hanyang Univ

Abstract - Isolated phase bus is, as a special bus which allows large current from a generator to main transformer, composed of main conductor, enclosure, and auxiliary equipments such as insulating bellows, bus elbows, support insulator, etc. To develop this kind of high power devices, it is required to secure the technique of selection of conducting and insulating materials, basic arrangement skills, and analysis on eddy current which causes temperature increase in enclosures. By the way, these techniques are based on the analysis of electromagnetic phenomena for high voltage and large current. In this study, an electromagnetic field analysis program is developed and applied to the isolated phase bus, which could be the basic numerical method for the analysis design and modifying isolated phase bus.

1. 서 론

상분리 모선은 발전기에서 주변압기까지의 수 천~수 만 A의 대전류 수송을 위한 특수 모선 접속 구조로서, 대형 알루미늄 외함, 주전류 통전용 도체, 도체 고정 및 지지를 위한 지지 절연물(Post Insulator) 및 기밀을 위한 Barrier Insulator 등으로 구성된다. 이와 같은 대전력용 기기의 개발을 위해서는 무엇보다 먼저 적용 환경인 고전압 및 대전류 통전에 대한 전자계 현상의 해석을 기반으로 도전재료 및 절연재료의 선정, 기본 배치 설계기술의 확보, 와전류에 의한 외함의 온도상승 해석등이 요구된다. 현재 상분리 모선을 생산, 공급 가능한 업체는 전세계적으로 10여개 정도로서, 자사 연구진에 의해 개발된 전자계 프로그램, 열현상 해석 및 기계적 강도 해석 소프트웨어등을 제품 기술 개발에 적극 활용함으로써 설계시 생길 수 있는 오류를 미리 방지하고, 설계변경 및 신제품의 안전성 및 고신뢰성화에 이용하고 있다. 그러나 국내의 경우는 상분리 모선에 대한 해석 및 설계에 대한 기술이 거의 전무한 상태이므로 이에 대한 연구가 시급한 상태이다. 이러한 필요성에 따라 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 상분리 모선에서의 대전류 통전에 의한 전자계 현상을 해석하였다. 특히 주도체를 둘러싸고 있는 외함에 유기되는 와전류가 시간의 경과에 따라 상분리 모선의 자계 분포에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 상분리 모선

그림 1은 상분리 모선의 구조 및 단면도를 나타낸 것이다. 내부 도체와 외함은 일반적으로 경량화의 장점을 가진 알루미늄을 사용하며, 간혹 동도체가 이용되기도 한다. 발전기와 모선 외함은 절연 주름관에 의해 전기적으로 절연된다. 외함은 일정 간격으로 구획화되어 있으며,

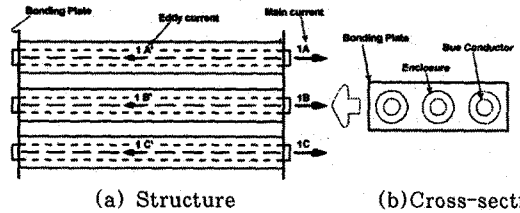


그림 1. 상분리 모선의 구조와 단면도
Fig. 1 The structure of Isolated Phase Bus

각 구획마다 3상 외함이 금속판으로 단락되어 접지되어 있다. 내부도체의 연결부는 접촉저항이 최소화 하기위해 접착잇기(Splices)구조로 되어있으며 모선 외함의 각 연결부는 Barrier insulator에 의해 밀봉된다.

본 연구에서는 실제로 상용화되어 있는 Carvert사(社)의 22kV, 12000A 정격의 상분리 모선을 해석모델로 사용하였으며, 표 1에 정격 사양을 나타내었다.

표 1에서 정격 허용전류는 허용된 온도 상승 범위 내에서 통전할 수 있는 최대 전류를 의미하며, 허용전류는 도체의 재질, 도체 및 외함의 구조, 주위 온도 및 설치 환경에 의해 결정된다. 내부 도체는 표피 효과를 고려해 튜브형으로 설계 되어 있으며 그 두께는 표피 깊이 ($\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma}$)를 고려해 결정된다. 외함은 주전류 도체와 외함에 흐르는 전류비를 조정하기 위해서 일반적으로 표피 깊이의 절반 정도의 두께로 구성된다.

표 1. 상분리 모선의 사양
Table. 1 Specifications for Isolated Phase Bus

정격 전압	kV	22
정격 허용전류	A	12000
정격 총격 내전압	kV	125
단시간 전류	kA	240
외피/도체 전류 비율	%	95
주도체		
재질		Aluminum
방사율		0.9
도전율	%IACS	57
외경	mm	533.4
두께	mm	9.525
외함		
재질		Aluminum
내부 표면 방사율		0.9
외부 표면 방사율		0.8
도전율	%IACS	57
외경	mm	996.95
두께	mm	6.35
상간 거리	mm	1495

2.2 지배방정식

상분리 모션에서의 전자기 현상은 변위전류를 무시할 수 있는 준 정상상태에서의 맥스웰 방정식 (1), (2)와 보조방정식 (3), (4)로 표현된다.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (4)$$

여기서, \mathbf{H} 는 자계의 세기, \mathbf{E} 는 전기계의 세기, \mathbf{J}_0 는 주도체 전류밀도, \mathbf{J}_e 는 와전류밀도이며, \mathbf{B} 는 자속밀도이다.

자속밀도 \mathbf{B} 와 자기벡터포텐셜 \mathbf{A} 의 관계는 식 (5)와 같이 표현되므로, 식 (1)은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (5)$$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e \quad (6)$$

식 (2)와 식 (5)에 의해 식 (7)이 유도된다.

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \quad (7)$$

여기서 스칼라 포텐셜 ϕ 는 일정 상수로 간주해도 되므로 $\nabla \phi = 0$ 이 된다. 전류밀도의 관계식 (3)을 식 (6)에 적용하면 지배방정식 (8)이 얻어진다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_0 - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (8)$$

본 연구에서는 입력전류는 정현파이며, 그에 따른 자속의 변화도 정현적이므로 식 (7)의 시간미분항은 페이저(phasor)를 이용해 소거할 수 있다. 식 (3) 및 식 (8)을 페이저를 이용하여 다시 표현하면 식 (9) 및 식 (10)과 같은 상분리 모션의 전자계 해석을 위한 기본식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_0 - j\omega \sigma \mathbf{A} \quad (9)$$

$$\mathbf{J}_e = -j\omega \sigma \mathbf{A} \quad (10)$$

식 (9)의 자기벡터포텐셜 \mathbf{A} 를 Galerkin법으로 근사하여 2차원으로 정식화하면 식 (11)과 같이 된다.

$$\int_S \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) A_{i\alpha} dx dy + j\omega \sigma \int_S N_i N_j A_{j\alpha} dx dy - \mathbf{J}_0 \int_S N_i dx dy = 0 \quad (11)$$

식 (11)을 행렬로 나타내면 식 (12)와 같으며 요소행렬의 값은 식 (13), (14)와 같다.

$$[S]^e [A]^e = [f] \quad (12)$$

$$S_{ij}^e = \int_S \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) A_{j\alpha} dx dy + j\omega \sigma \int_S N_i N_j A_{j\alpha} dx dy \quad (13)$$

$$f_i^e = -\mathbf{J}_0 \int_S N_i dx dy \quad (14)$$

여기서 요소내에서의 포텐셜 값을 1차 보간함수에 의해 $\mathbf{A} = \sum_{i=1}^3 N_i A_i$ 로 근사화하여 식을 정리하면 요소행렬의 계수값들은 식 (15), (16)과 같다.

$$S_{ij} = \frac{1}{4\mu \Delta^e} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 \\ b_2 b_1 + c_2 c_1 & b_2 b_2 + c_2 c_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 \\ b_3 b_1 + c_3 c_1 & b_3 b_2 + c_3 c_2 & b_3 b_3 + c_3 c_3 \end{bmatrix} + j \frac{\omega \sigma \Delta^e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

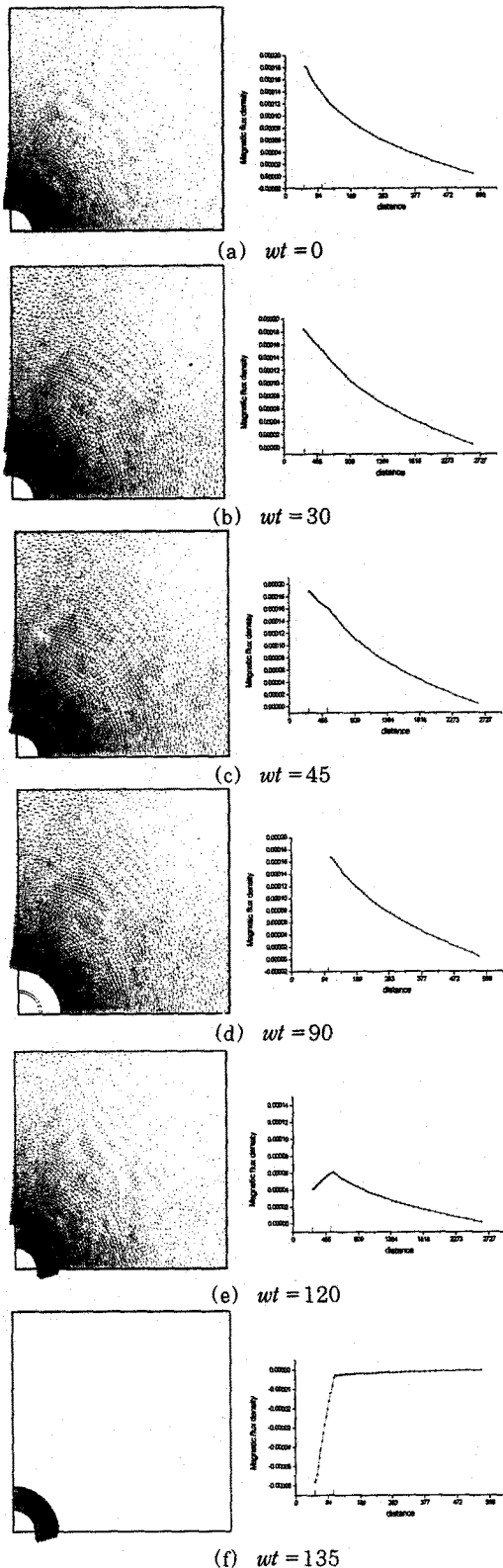
$$f_i = \frac{J_0 \Delta^e}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서 Δ^e 는 요소면적, $b_i = y_j - y_k$, $c_i = x_k - x_j$ 이고 σ 는 2차측 도체의 도전율이다.

2.3 해석결과 및 고찰

본 연구에서는 상분리 모션을 구성하는 3상 요소중 1상을 해석 모델로 하여 자속밀도와 와전류를 해석하였다. 그림 2의 (a)~(f)는 각각 위상이 0, 30, 45, 90, 120, 135°일 때 상분리 모션에서의 반경 방향 자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 그림을 보면 주전류에 의해 유기되는 자계와 자계의 시간적 변화로 유기되는 와전류에 의한 2차 자계가 중첩되어 다소 복잡한 형태로 나타나는데, $\omega t = 30^\circ$ 일 때를 보면 내부 도체에 흐르는 전류가 감소함에도 불구하고 외부 자계의 세기는 증가함을 알 수 있다. 이는 외함에 주전류와 같은 방향의 와전류가 유기되기 때문이다. 외부자속은 $\omega t = 45^\circ$ 일 때 최대가 된 후, 다시 점차 감소함을 알 수 있다. 또한 위상이 90도까지 진행되어 내부 전류가 0이되는 시점에서 외함에 유기되는 와전류는 최대가 됨을 볼 수 있는데 이는 이 시점에 자속밀도의 시간적 변화가 최대이기 때문이다. 위상이 90도를 넘으면서 내부 전류와 외함의 와전류는 방향이 반대가 되어 외부자계는 더욱 감소하게 되는데, 120도일 때의 자속분포를 보면 이 두 전류에 의한 자속분포가 서로 상쇄되어 상대적으로 낮은 값을 가짐을 볼 수 있다. 위상이 135도인 시점에는 내부 전류와 와전류가 크기는 같고 방향이 반대이므로 이때의 외부 자속은 거의 존재하지 않게 된다.

그림 3은 위상에 따른 상분리 모션 외부의 자계의 세기변화를 나타낸 것으로, 축으로부터 500mm, 1000mm, 1500mm 지점에서의 자계의 세기 변화이다. 그림 2에서의 복잡한 자계의 변화를 그림 3에서 다시 살펴보면 그 변화 양상을 쉽게 파악할 수 있다. 즉 축으로부터 일정한 거리에 있는 한점에서의 자계는 주전류와 어느 일정한 위상각을 갖고 정현적으로 변화함을 볼 수 있으며, 위상 135도 부근을 기준으로 자속은 그 방향이 바뀌어 다시 상승하기 시작한다.



(f) $wt = 135$
 그림 2. 자속의 공간적 분포
 Fig. 2 Magnetic flux density with various phase angle

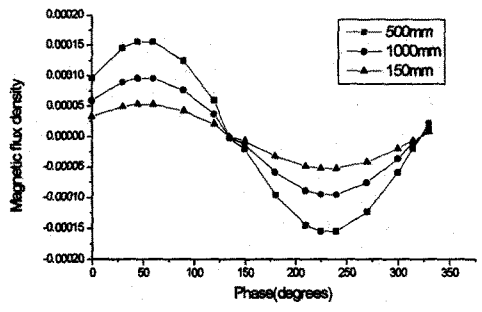


그림 3. 외함 주변에서의 자속밀도의 주기적 변화
 Fig. 3 Periodic variation of Magnetic flux density around enclosure

3. 결 론

본 논문에서는 유한 요소법을 이용하여 대전력용 상분리 모선에서의 전자기 현상을 살펴보았다. 상분리 모선의 외함은 고전압의 내부 도체를 외부와 격리시켜주는 역할을 하지만, 주도체에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자계의 영향으로 외함에는 와전류가 유기된다. 유기된 와전류는 주전류에 의한 자계를 왜곡시켜 외부 자계를 강화시키기도 하고, 약화시키기도 하지만 결국 변화된 자계 역시 정현적 제적을 따르게 됨을 볼 수 있었다.

결과적으로 상분리 모선의 외함은 자계를 차폐한다든지 반대로 심한 왜곡을 야기하지는 않는다는 것을 알 수 있다. 향후 3상 주전류와 와전류의 상호작용을 모두 고려하여 외함에서 발생하는 열손실에 대한 연구를 진행할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 한국전력공사의 연구비 지원에 의해 기초전력공학공동연구소 주관으로 이루어진 과제 결과의 일부로 이에 감사 드립니다. (관리번호 : 99-045)

(참 고 문 헌)

- [1] 任達鎬, "電氣係의 有限要素法", 동명사, 1986
- [2] Wolfgang Andree, "3D Eddy Current Computation in the Transverse Flux Induction Heating Equipment", IEEE Trans. on Magn., Vol. 30, No.5, September 1994
- [3] 崔勝吉, "3차원 수치해석 기법을 이용한 전력용 차단기의 전자기 현상 해석", 漢陽大學校 大學院, 2000
- [4] O. Bottauscio, E. Carpaneto, et al., "Numerical and experimental evaluation of magnetic field generated by power busbar systems", IEE Proceedings Generation Transmission & Distribution, Vol. 143 No. 5, September 1996