

초전도 전력케이블의 인덕턴스 산정에 관한 연구

최석진, 송명곤, 이상진, 심기덕*, 조전욱*
위덕대학교, *한국전기연구원

A Study on the Inductance computation of a Superconducting Power cable

S.J. Choi, M.K. Song, S.J. Lee, K.D. Sim*, J.W. Cho*

Div. of Elec. Eng., Uiduk Univ., *KERI

Abstract - 신뢰성 있는 초전도전력 케이블의 설계를 위하여 초전도 케이블 각층의 인덕턴스 산정방법을 기존 방법과 새로 제안된 방법을 비교하였으며, 새로 제안된 방법에 의한 인덕턴스 계산을 검증하기 위하여 상용전자장해석 프로그램을 이용하여 그 계산결과를 비교하였다. 기존의 초전도 전력케이블의 인덕턴스 산정방식인 Go and Return Method 및 Energy Method에 대한 전자기적 타당성을 재검토하였으며, 더 나아가 Newman Method와 Geometric Mean Distance를 결합한 Neumann-GMD Method를 제안하였다. 각 방법의 신뢰성 검증을 위하여 상업적으로 검증된 전자장 해석 tool인 OPERA를 이용하여 특정 퍼치에 대한 2층 구조의 케이블을 모델링하고 그 인덕턴스를 계산하여, 각 방법에 의하여 계산된 인덕턴스 값과 비교하였다. 이 과정을 통하여 가장 신뢰성 있는 인덕턴스 계산법을 선택하여 초전도 전력 케이블의 설계에 적용하고자 한다.

1. 서 론

초전도 전력케이블은 R.McFee에 의해 처음 제안되어, 이후부터 1980년대 초까지 미국, 일본, 유럽 등의 세계 각국에서 초전도 케이블에 대한 많은 연구개발이 진행되고 있다. 그 중에서도 미국의 Brookhaven 국립연구소(BNL), 오스트리아의 Gratz 연구소, 일본의 전자기술 통합연구소(BTL) 등에서는 실용화에 가까운 수준의 초전도 전력케이블을 개발하였으나 이 시기의 초전도 케이블은 Nb, NbTi, Nb3Sn과 같은 저온 초전도 도체를 사용한 시스템으로서 액체헬륨 온도에서 운전되어야 하는 극저온 환경으로 인한 신뢰성 및 경제성의 한계로 실용화가 이루어지지 못하였다. 그러나 1987년 액체 질소온도에서 사용 가능한 고온 초전도체가 발견되고 1990년 중반 이후부터 실제 전력기기에 적용이 가능한 실용성 있는 고온 초전도선이 개발되면서 2000년대에 들어선 최근에는 세계적인 케이블 제조업체와 전력회사들이 경쟁적으로 개발하여 고온 초전도 전력케이블의 상용화개발에 박차를 가하고 있다.[1]

고온 초전도 전력케이블의 인덕턴스는 상전도 전력케이블과 비교하여 각층의 전류 분류를 결정하는 중요한 파라미터이다. 본 논문에서는 기존의 초전도 케이블 코아 설계에 사용했던 설계법 특히, 코아 각층의 자기 인덕턴스 및 중간의 상호 인덕턴스 계산법을 재검토하여 장단점을 파악하였으며, 동시에 좀 더 신뢰성 높은 계산법을 도출하여 케이블 코아 설계에 적용하도록 하였다. 또한 전자장 해석 tool인 OPERA를 사용하여 인덕턴스를 구한 후, 그 결과를 인덕턴스 계산법과 비교하여 신뢰성을 검증하였다.[2]

2. 본 론

2.1 기존의 인덕턴스 계산법의 기본 이론

기존에 인덕턴스를 계산하기 위한 방법은 크게 Go and Return법 및 Energy법, 두 가지로 볼 수 있다. 이 두 가지 방법에 대한 기본 이론은 다음과 같다.

2.1.1 Go and Return Method

Go and Return Method는 그림 1과 같은 동축 케이블 모델에서 출발한 개념이다. 기본식은 저온 초전도 선재의 strand inductance 계산법에 기초한다. 동축케이블의 인덕턴스를 구한 후 케이블 형상을 고려한 선재의 twist 효과를 주기 위해 twist factor를 곱하여 self inductance, mutual inductance를 구한다. 각 층의 self inductance는 아래의 L_i 와 같이 정의되며 i 와 j 층의 mutual inductance는 아래의 M_{ij} 와 같이 정의된다.

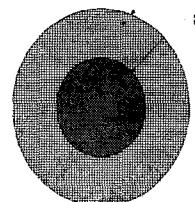


그림 1 동축케이블

$$temp = \ln b - \frac{a^4}{(b^2 - a^2)^2} \ln \left(\frac{b}{a} \right) + \frac{3a^2 - b^2}{4(b^2 - a^2)}$$

$$L_i = \frac{\mu (\ln 2 - temp - 1)}{2\pi} + \frac{\mu_0 (\tan \alpha_i)^2}{4\pi}$$

$$temp = \frac{b^2 \ln b - a^2 \ln a}{b^2 - a^2} - \frac{1}{2}$$

$$M_{ij} = \frac{\mu (\ln 2 - temp - 1)}{2\pi} + \frac{a \mu_0 (\tan \alpha_i)(\tan \alpha_j)}{b 4\pi}$$

2.1.2 Energy Method

Energy Method는 도체 루프 안으로 전류를 보내는 데 필요한 일이 자기에너지로 저장되는 개념이다. 무한장 원주도선의 경우 도선내부에는 자속이 완전 상쇄되며, 원주 외부에만 자속이 존재한다. 그러나 원주도선의 선재들이 twist 되기 시작하면서 자속이 변하게 되는데, 이 때, 내부자속 B_{in} 과 외부자속 B_{out} 에 관한 식은 다음과 같다.

$$B_{in} = \mu_0 I / Lp \quad (r < a)$$

$$B_{out} = \mu_0 I / 2\pi r \quad (r > a)$$

여기에서 cable 외부자장은 cable를 무한장 단일직선 선재로 간주하고 유추한 것이며, L_p 는 twist pitch factor로 twist pitch의 영향에 대한 계수이다. 내부자속과 외부자속에 관한 식을 사용하여 단위 전류 통전시 내부 및 외부에 축적된 에너지를 계산하는 방법으로 self inductance와 mutual inductance를 계산한다.

self inductance L 은 다음과 같이 정의될 수 있으며,

$$W_m = \frac{1}{2\mu_0} \int_0^a E_{in}^2 dv + \frac{1}{2\mu_0} \int_a^V E_{out}^2 dv$$

$$= \frac{1}{2} \frac{\pi \mu_0}{L_p^2} a^2 I^2 + \lim_{D \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D}{a} \right) I^2 = \frac{1}{2} L I^2$$

$$L = \mu_0 \frac{\pi a^2}{L_p^2} + \lim_{D \rightarrow \infty} \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D}{a} \right)$$

mutual inductance M_{ij} 는 다음과 같이 정의된다.

$$W_m = \frac{1}{2} \left(\mu_0 \frac{\pi r_i^2}{L_{pi}^2} + \lim_{D \rightarrow \infty} \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{r_i} \right) I_i^2$$

$$+ \left(a_i a_j \frac{\mu_0 \pi r_i^2}{L_{pi} L_{pj}} + \lim_{D \rightarrow \infty} \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{r_j} \right) I_i I_j$$

$$+ \frac{1}{2} \left(\mu_0 \frac{\pi r_j^2}{L_{pj}^2} + \lim_{D \rightarrow \infty} \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{r_j} \right) I_j^2$$

$$M_{ij} = a_i a_j \mu_0 \frac{\pi r_i^2}{L_{pi} L_{pj}} + \lim_{D \rightarrow \infty} \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D}{r_j} \right)$$

그러나 Energy Method에서 self inductance와 mutual inductance을 구하는 경우, 유효적분거리 D 를 일반적으로 산출해내기 힘든 단점이 있다.

2.2 Neumann-GMD Method

Neumann-GMD method는 원주도선 내부의 자속이 기여하는 inductance는 Energy method에서 사용한 내부 인덕턴스 성분을 이용하고 도선 외부의 자속이 기여하는 인덕턴스 성분은 쇄교자속을 구하기 위해 Vector Potential을 도입한 Neumann formula와 G.M.D를 이용하여 구하는 방법이다. 먼저 Neumann식을 살펴보면 Neumann 식은 전류 I_1 과 I_2 가 흐르는 두 개의 폐루프 C_1 과 C_2 를 가정한다. 그리고 각 루프에 쇄교되는 자속량을 계산하여 inductance를 정의하는 방법으로 inductance의 물리적 의미를 그대로 수식적으로 옮겨놓은 방법이다. 따라서 무한영역의 적분을 피할 수 있고 회로와 회로가 갖는 기하학적 위상관계만으로 inductance를 정의할 수 있다는 장점이 있다. 이렇게 정의된 self inductance와 mutual inductance는 아래의 식 L_2 , M_{21} 와 같이 정의된다.

$$\vec{A}_{21} = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \oint_{c_1} \frac{d\vec{l}_1}{r}$$

$$\Phi_{21} = \int \vec{B}_{21} d\vec{s}_2 = \int \nabla \times \vec{A}_{21} d\vec{s}_2 = \oint_{c_2} \vec{A}_{21} d\vec{l}_2$$

$$= \oint_{c_2} \left(\frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \oint_{c_1} \frac{d\vec{l}_1}{r} \right) d\vec{l}_2 = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \int_{c_1} \int_{c_2} \frac{d\vec{l}_1 d\vec{l}_2}{r}$$

$$L_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{c_2} \frac{d\vec{l}_2 d\vec{l}_2}{r} \quad M_{21} = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \int_{c_1} \int_{c_2} \frac{d\vec{l}_1 d\vec{l}_2}{r}$$

여기서 GMD의 개념을 도입하여 mutual inductance를 정의하게 된다. GMD란 선재간의 단순기하 평균거리로 필요 물리량 사이의 관계를 얻으려는 생각에서 생긴 개념이다.

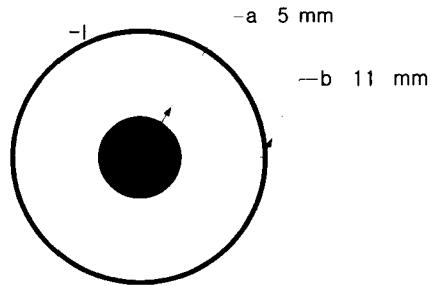


그림 2 OPERA 해석을 위한 동축케이블 모델

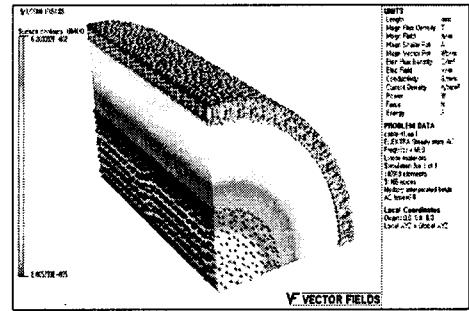


그림 3 해석결과

2.3 이론식과 해석의 비교

2.3.1 OPERA의 신뢰성 검증

인덕턴스 계산식의 신뢰성을 검증하기 위해서 상용 인덕턴스 해석 프로그램인 OPERA를 사용하였다. 먼저 OPERA의 해석결과에 대한 신뢰성을 위하여 동축케이블을 선정하고, 이 모델에 대하여 인덕턴스 계산법을 이용하여 계산한 인덕턴스 값과 OPERA의 해석결과를 비교하였다. 그림 2는 OPERA의 신뢰성을 검증하기 위한 동축케이블 모델이며, 그림 3은 그에 대한 자기장 해석결과이다. 이 동축케이블에 대한 이론적 계산식을 보면

$$L = \frac{\mu_0}{8\pi} + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{b}{a} \right)$$

와 같다. 이 식을 이용하여 인덕턴스를 구하여 보면 $0.2077[\mu H/m]$ 이 나오며, OPERA를 이용하여 해석한 인덕턴스 값은 OPERA-2d에서는 $0.2080[\mu H/m]$, OPERA-3d에서는 $0.1984[\mu H/m]$ 가 나왔다. 결과에서는 약간의 차이를 보였지만, 이 차이는 해석상의 오차이며 값의 차이가 그리 크지 않기 때문에 OPERA의 신뢰성을 믿을 수 있다고 판단하였다.[3]

2.3.2 인덕턴스 계산식과의 비교

실제 초전도케이블은 여러층의 코아가 각각 다른 pitch를 가지고 twist되는 구조이기 때문에, 모델링을 위한 케이블 코아의 길이 설정이 어려우며, 또한 길이 설정이 가능하다고 하여도 해석시간이 상당히 많이 걸리게 된다. 결국, 길이적인 방향으로 짧은 영역을 설정하여 해석을 수행할 수밖에 없다. 그러나 짧은 영역을 설정하여 해석하는 경우에 자기장의 흐름 현상에 의해 신뢰성이 떨어지게 된다. 정확한 해석을 위해서는 신뢰성을 확보할 수 있는 영역을 설정해야만 한다. 이러한 영역을 설정하기 위하여, 먼저 총 길이 40mm 인 초전도 케이블 코아 모델을 선정하고, 이에 대하여 2, 6, 12, 20, $40[\text{mm}]$ 되는 구간에서 인덕턴스를 계산하여 그 추이를 조사하였다. 그 결과는 그림 4와 같다. 결과를 보면 해석영역 4mm 구간 이내에서 인덕턴스의 변화가 거의 없었으며, 따라서 이 영역을 해석을 위한 영역으로 정하였다.

표 1 이론식과 해석을 통한 인덕턴스 결과 비교

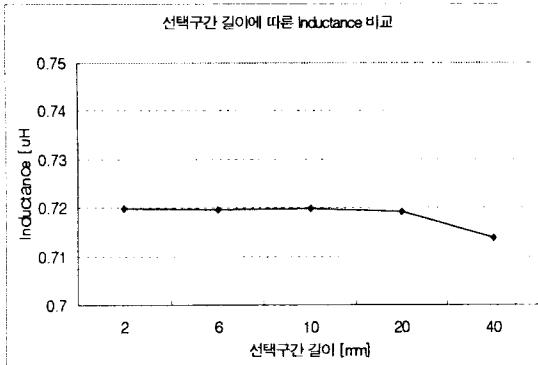


그림 4 해석영역의 선택구간에 따른 인덕턴스 값의 변화

이제 실제 초전도케이블 구조와 비슷한 2층 구조의 케이블 코아를 모델링하여 이론식에 대한 검증을 하였다. 먼저 모델에 대하여 각각의 이론식을 이용하여 인덕턴스를 구하고, 구한 인덕턴스 결과값을 OPERA를 이용하여 해석한 결과와 비교하여 검증을 수행하였다. 그림 5는 이론식 검증을 위해 설계한 2층의 구조를 가지는 초전도 전력케이블 코아의 해석모델이며, 그림 6은 초전도 전력케이블의 자기장 분포이다.

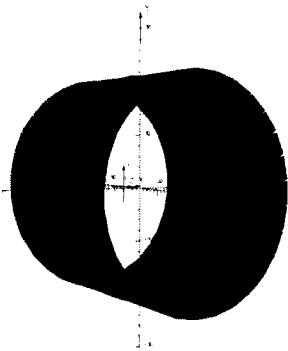


그림 5 초전도 전력케이블 해석모델

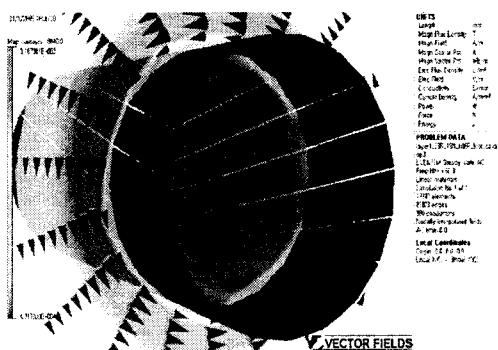


그림 6 초전도 전력케이블 자기장 분포

Pitch [mm]	Method	L_1	M_{12}	L_2
200	Method 1	0.5429	0.4996	0.5344
	Method 2	0.6863	0.6412	0.6776
	Method 3	-	-	-
	OPERA	-	-	-
300	Method 1	0.5336	0.5089	0.5240
	Method 2	0.6770	0.6510	0.6672
	Method 3	0.8097	0.7832	0.8002
	OPERA	0.8032	0.7763	0.7932
400	Method 1	0.5303	0.5122	0.5203
	Method 2	0.6737	0.6545	0.6636
	Method 3	0.8063	0.7869	0.7964
	OPERA	0.8018	0.7786	0.7917
500	Method 1	0.5288	0.5137	0.5187
	Method 2	0.6722	0.6561	0.6619
	Method 3	0.8047	0.7886	0.7946
	OPERA	0.8012	0.7797	0.7910
600	Method 1	0.5280	0.5145	0.5177
	Method 2	0.6714	0.6569	0.6610
	Method 3	0.8038	0.7894	0.7937
	OPERA	0.8007	0.7802	0.7907

이론식과 해석을 비교한 결과는 표 1과 같다. pitch를 200mm에서 600mm까지 100mm씩 크게 하였으며 각 pitch에 대해 세 가지 이론식과 해석을 이용하여 self inductance와 mutual inductance를 구하고 비교하였다. Method 1, Method 2, Method 3는 각각 Go and Return Method, Energy Method, Neumann-GMD Method를 의미한다. 비교한 결과를 보면 해석결과에 가장 근접한 인덕턴스 계산 방법은 Method 3, 즉 Neumann-GMD Method이었으며, 따라서 초전도 케이블 시스템의 인덕턴스 계산시 Neumann-GMD Method를 사용하는 것이 더 효과적임을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 기존의 인덕턴스 계산 방식과 새로 제안된 인덕턴스 계산 방식에 대해서 비교하였다. 본 논문의 결론은 다음과 같다.

- 1) Pitch를 가지고 twist되는 케이블 코아에 대해서 계산과 해석을 통해 인덕턴스를 도출하였다.
- 2) 인덕턴스 계산에 대해 신뢰성을 검증할 수 있는 변수 모델을 설계하였다.
- 3) 새로 제안된 Neumann-GMD Method가 기존의 인덕턴스 계산방법보다 더 효과적이었으며, 새로 제안된 인덕턴스 계산방법을 사용하여 좀 더 신뢰성 있는 초전도 케이블 코아 설계를 가능하게 하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 성기철, 배전급 초전도 전력케이블 개발, 2003 DAPAS Program Workshop, 차세대 초전도용용 기술개발 사업단, 2003
- [2] S.Fuchino, N. Tamada, I. Ishii, N. Higuchi, Hydraulic characteristics in superconducting power transmission cables, Physica 345, pp.125-128, 2001
- [3] Vectorfields, "OPERA-3d Reference Manual". Vectorfields v9.0, 2003