

나전선(裸電線)의 저손실화 설계

정 연호, 이 형권, 손 흥관, 조 연구  
한국전기연구소

Design of the Bare Electric Wire for Low Loss

Y.H. Jeong, H.K. Lee, H.K. Shon, Y.K. Cho  
KERI

**Abstract** - New transmission lines are gradually constructed with high voltage and power for increase of electric power demands. And electric losses that are produced in line are increased, we made the algorithm for low loss wire and developed the computer program that makes loss of electric wire to be decreased for efficient power transmission. Electric wire is designed not to be decreased electrical and mechanical properties than that of existing electric wire.

AC/DC 저항비를 증가시키게 된다. 이것은 각 층에 흐르는 전류가 자계분포에 영향을 주는 것으로 도체의 소선의경을 층에 따라 다르게 구성하고 각 층의 피치를 적절하게 설정한다면 코어에서 유기되는 자속을 억제할 수 있다[1,2]. 이것을 바탕으로 본 논문에서는 코어내에 유기되는 자속제산 기본식을 손실해석법으로 이용하여 저손실 전선을 설계하는 알고리즘과 설계프로그램을 작성하였다.

1. 서 론

전력수요의 꾸준한 증가로 인해 신규 송전선로는 고전압, 대전력화 추세에 있다. 이에 따라 송전계통에서 발생하는 에너지 손실 또한 증가되어 보다 효율적인 전력수송을 위해서는 적절한 손실저감대책이 요구된다. 송전계통에서 발생하는 상당량의 전력손실은 수천 Km의 네트워크를 구성하고 있는 송전선에서 발생되고 있다. 현재 국외에서는 전력손실 및 건설비용절감 그리고 선로부지의 극소화 등을 목적으로 송전선로의 Compact화 연구가 활발히 진행되고 있으며 이와 더불어 전선 자체에서 발생하는 전력손실을 줄이고 송전용량을 늘리기 위해 다양한 연구가 이루어지고 있다.

본 논문에서는 효율적인 전력수송 대책의 일환으로서 송전선에서 발생하는 전력손실이 저감되도록 저손실형상구성 알고리즘을 제안하여 설계프로그램을 작성하고 가공송전용 나전선을 저손실화 설계하였다. 설계된 저손실화 전선은 기존선로에 적용된 나전선의 형태를 수정하여 저손실화한 것으로서 인장강도 및 중량 등의 기계적 특성과 허용전류가 저하되지 않도록 구성하여 기존선로에 다른 설비없이 적용이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

2. 송전선의 저손실 설계

기존전선은 소선층에 관계없이 코어부분과 도체부분에서 소선의 외경이 모두 동일하게 구성되며 도체층은 코어를 중심으로 이웃하는 층과 서로 반대방향으로 꼬여진 형상을 갖는다.



그림 1. ACSR의 형상 및 단면

이러한 형태의 도체가 홀수층으로 구성되면 자계분포가 불균형을 이루어 코어에서는 길이방향의 자속이 유기되

2.1 손실해석 기본식

나선방향의 ACSR 소선에서 유기되는 전압[2]은

$$V = \int_{loop} \rho J \cdot dt + \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

이고, 도체의 단위길이당 전압강하는 소선들이 평행하게 구성되므로 모든 층에서 같은 값을 갖는다. 따라서,

$$V = \frac{\rho I_i}{A_i} + (j\omega\mu\alpha) \frac{H}{l_i} \quad (2)$$

여기서,

- $I_i$  :  $i$ 층에 흐르는 전류 [A]
- $A_i$  :  $i$ 층의 단면적 [ $mm^2$ ]
- $\alpha$  : 코어의 단면적
- $l_i$  :  $i$ 층의 피치 (left:-, right:+)
- $\theta$  : lay angle

코어에서 발생하는 축방향 자계 H는

$$H = \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{l_i} \quad (3)$$

이다.

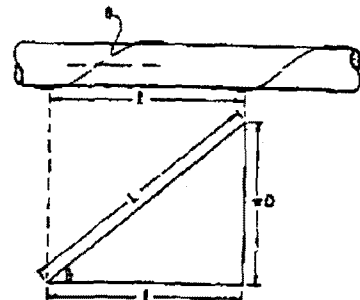


그림 2. ACSR의 구성

식(2)의 두 번째 항은 코어의 축방향 자계에 의해서 발생하는 유도성 전압강하이다. 만일 자계 H가 전선내에서 균형을 이루도록 도체소선이 배열된다면, 즉  $H = 0$  이라면 식(2)는 다음과 같이 수정된다.

$$V = \frac{\rho l_1}{A_1} = \frac{\rho l_2}{A_2} = \frac{\rho l_3}{A_3} \quad (4)$$

식(4)는 전류밀도  $I/A$ 가 도체의 모든 층에서 일정하며

전류  $I_i$ 는 면적  $A_i$ 에 비례한다는 것을 의미하는 것으로서 식(3)은 식(5)로 표현할 수 있다.

$$H = \left| \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{l_i} \right| = 0 \quad (5)$$

식(5)는 1[A]의 전류가 소선에 흐를 때 1[mm<sup>2</sup>]의 코어에서 발생하는 자계의 세기로써 층의 단면적과 피치만으로 도체의 손실해석이 가능하다는 것을 나타낸다. 따라서 식(5)에 만족하도록 도체가 구성된다면 AC/DC 저항비는 최소화될 것이다. 캐나다의 Barrett등은 시험에 의해 H가 2층 도체에서는 0.1이하, 3층 도체에서는 0.25이하의 값을 가질 때 전선의 손실이 최소화될 수 있다고 제안했다.

### 2.2 형상구성 알고리즘

기본식에 의해 전선을 구성하기 위한 제약조건은 코어에서 유기되는 자계로서 각 층의 단면적과 피치로 구성된다. 단면적을 계산하고 피치를 결정하기 위해서는 다음과 같은 기본 구조변수가 요구된다.

- ① 코어와 도체의 층수
- ② 소선의 외경
- ③ 소선의 개수
- ④ 각 층의 외경과 평균외경

전선을 구성하기 위해 고려해야 할 사항으로 같은 층에서 소선을 평행 배열했을 때 소선사이의 공간을 나타내는 clearance factor가 있다. 각 층이 나선방향으로 감기 때문에 소선의 실제 단면적은 타원형이다. 따라서 적절한 소선배치를 위해서는 각 소선간 공간을 소선지름의 2.5%까지 고려해야 한다. 또한 장력이 인가될 때 소선들의 위치 고정을 위해 1%정도 공간이 더 요구되어 총 3.5%정도의 간격이 요구된다[3]. 본 논문에서는 전선을 설계하기 위해 이 값을 기준으로 clearance factor의 허용범위를 2.5~5%로 제한하였다.

저손실 전선은 기존의 전선을 기본 모델로 설정하여 설계된다. 이것은 최종 설계된 전선의 특성을 기존 전선과 비교하고 기존 전선을 대체하여 선로에 응용할 수 있는 가능성을 검토할 수 있기 때문이다. 저손실 전선의 설계 과정은 모듈별로 구성된다.

- ① 전선의 기하학적 기본 데이터 설정
- ② 전기적·기계적 특성 및 자계 계산
- ③ 특성평가 및 재구성 판단모듈
- ④ 형상구성 판단 및 수정 모듈

먼저, 기존 전선의 기하학적 치수를 이용하여 전기적, 기계적 특성과 코어에서 유기되는 자계를 계산하고 이것을 기준치와 비교한다. 3층 도체에서는 코어내에 유기되는 자계가  $H \leq 0.25$ 를 만족시켜야한다. 이를 만족시키지 못한다면 형상을 재구성하게 되며, 1층과 3층에서 유기되는 자계의 합과 2층에서 유기되는 자계가 서로 균형을 이루어야 하므로 2층의 소선외경이 1층과 3층보다 크다. 그리고 소선외경은 층의 소선수를 고려하여 clearance factor가 적절한 값이 되도록 결정해야 한다.

표1. 기존 전선의 피치(층외경의 배수)(KS C3113)

도체 \ 층	1층	2층	3층
2층 도체	10~16	10~14	
3층 도체	10~17	10~16	10~14

또한 각 층의 외경과 연정(lay factor)의 곱으로서 계산되는 피치를 설정해야 하는데 각 층의 피치 관계는 1층과 3층의 피치증가 방향과 2층의 방향이 반비례한다. 따라서 자계의 값이 감소하는 쪽으로 피치값을 탐색하기

위해 본 논문에서는 수치해석의 2분법을 이용하여 탐색 방향을 결정하였으며 최대·최소 제한범위는 기존전선의 제작에 적용되는 표1의 피치범위로 설정하였다.

전선은 나선방향으로 감기 때문에 소선의 실제길이는 피치보다 길다. 그리고 전선에 흐르는 전류가 소선을 따라 나선방향으로 흐르기 때문에 전선의 용량 및 인장강도계산에서는 늘어난 실제 소선의 길이를 이용하여 계산한다. 피체에 따른 소선의 실제길이는

$$L_i = l_i \cdot \cos \theta_i \quad (6)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \frac{\pi D_i}{l_i} \quad (7)$$

와 같다(그림2 참조). 여기서  $\theta_i$ 는  $i$ 층의 lay angle이고  $D_i$ 는  $i$ 층의 평균외경이다.

저손실 전선의 설계는 코어에서 유기되는 자계가 감소하도록 형상수정과 피치선정작업을 반복적으로 처리하는 과정으로서 그 알고리즘을 그림3의 흐름도로 나타내었다. 본 설계에서는 도체부분에서의 소선외경, 층배열 및 피치등의 형상측면에서 손실문제를 다루기 때문에 코어부분의 형상과 특성은 변화시키지 않았다.

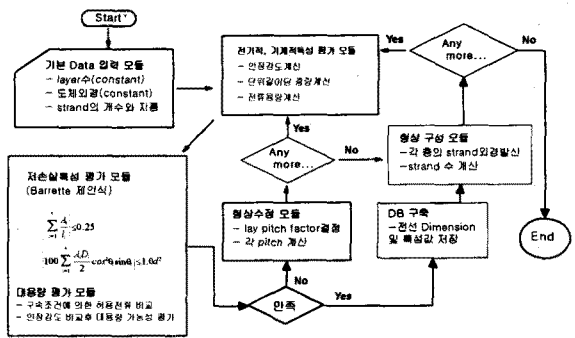


그림3 저손실 전선설계의 흐름도

### 2.3 저손실 전선의 설계

저손실 전선을 구성하고 특성을 비교하기위해 ACSR "Grackle" 전선을 기본 모델로 선정하였다. 이 전선의 특성은 표2와 같으며 코어에서 발생하는 자계는 0.5476로 기준값인 0.25와 비교하여 큰 값으로 나타났다.

표2 ACSR "Grackle"의 특성

stranding	St 19/0.0892, Al 54/0.1486
중량 [lb/1000ft]	1534.1
dc저항 [ $\Omega$ /1000ft]	0.01469
인장강도 [lb]	41860.1
허용전류 [A]	1032.3

저손실 전선설계의 흐름도에 의해 설계프로그램을 작성하고 Grackle 전선의 기하학적 치수를 입력하여 수행한 결과로서 코어에서 발생하는 자계가 기준값 이하로 개선된 저손실 전선의 형상은 총 29000여개가 출력되었다. 이 중에서 인장강도, 허용전류, 중량의 특성이 기존 전선의 값을 유지하거나 개선된 저손실 전선의 형상은 7000여개가 출력되었다. 출력된 저손실 전선의 형상모델과 특성을 그림4와 표3에 나타내었다.

출력된 형상은 중간층 소선의 외경이 내층과 외층의 소선에 비해 커진 것을 볼 수 있다. 이러한 형상중에는 소선외경이 너무 크거나 작아서 실제 제작상의 문제를 일으키는 경우가 있을 수 있으므로 적절한 형상선택이 이루어져야 한다.

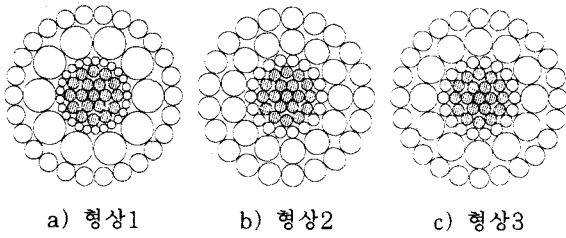


그림4 저손실 전선의 형상

표3. 저손실 전선의 특성

특성	형상	형상1(a)	형상2(b)	형상3(c)
stranding (EA/inch)	1층	25/0.0619	18/0.0888	18/0.0891
	2층	10/0.2452	13/0.1889	12/0.2090
	3층	26/0.1387	21/0.1681	24/0.1477
pitch (D <sub>1</sub> 의 배수)	1층	13.5	16.35	15.21
	2층	13	10.05	10.77
	3층	12	13.78	12.37
장력 (lb)		41966.6	41905.8	41947.9
중량 (lb/1000ft)		1529.8	1533.9	1527.1
DC저항 (Ω/1000ft)		0.01451	0.01451	0.01463
허용전류 (A)		1038.4	1038.4	1034.4
손실계수 H		0.000127	0.0001016	0.000127

\* 코어의 stranding(19/0.0892)과 피치는 일정

표3에 의하면 저손실 전선의 형상모델은 전기적·기계적 특성이 기존 Grackle전선 보다 떨어지지 않는 상태로 코어에서 유기되는 자계가 현저히 감소되었다. 이것은 코어에 의해 발생하는 히스테리시스 손실과 와전류 손실이 기존 전선에 비교하여 현저히 감소된 저손실화 전선을 의미하며 기존 선로에 다른 보조장치나 장비없이도 적용이 가능하다는 것을 나타낸다. 또 장력이 증가하고 중량이 감소한 형상에서는 코어부분을 감소시키고 도체부분을 증가시킨다면 허용전류를 키울 수 있다. 현재 본 설계프로그램에서는 이러한 작업을 위해 최적형상구성의 연구가 진행중이다.

각 층에서 소선의 외경과 소선수가 결정되면 설계의 최종단계는 피치의 결정이다. 본 설계프로그램에서는 피치의 제한범위를 설정하고 2분법을 이용하여 범위내에서 탐색과정을 수행하였는데 피치의 변화에 의한 손실계수 곡선은 각 층의 소선의외경에 따라 변화정도가 다르게 나타났다. 그림5는 피치의 변화에 따른 손실계수 H의 변화를 나타내고 있다. 각 층에서의 피치는 층외경의 배수를 의미한다. 피치범위 내에서 기준값 이하의 손실계수가 탐색되지 않으면 소선의외경을 바꾸는 작업이 수행된다.

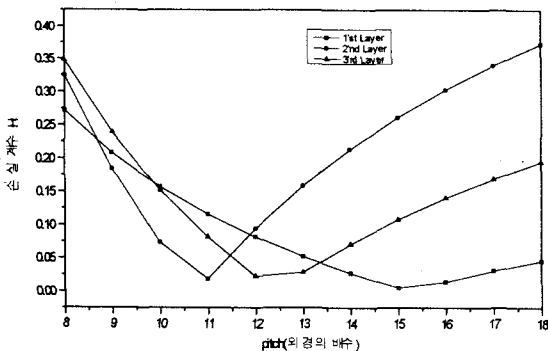


그림5 층의 피치변화에 의한 손실변화

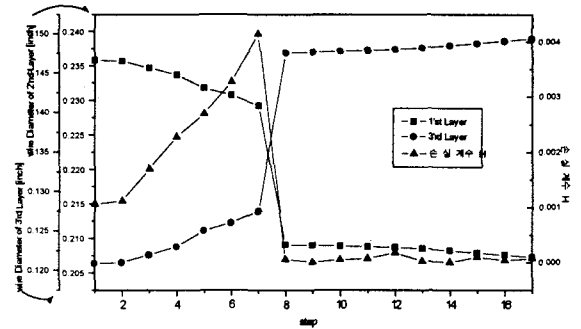


그림6 소선 외경변화에 의한 손실변화

각 층에서 소선의외경의 상대적인 크기에 의해서도 손실계수가 변화되는데 1층과 3층의 외경증가와 2층의 외경증가 방향은 반비례한다. 그림6에는 최내층의 소선의외경을 고정간후 중간층과 최외층의 소선의외경이 변화할 때 손실계수의 변화추이를 나타냈다. 소선의외경의 변화에 따라 손실계수가 현저하게 변화되는 그림6과 같은 구간이 소선의외경에 따라 여러 범위에서 분포하고 있기 때문에 적절한 손실값을 얻기 위해서는 최적탐색 작업이 요구된다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 코어내에서 유기되는 자계계산식을 기본식으로 저손실 전선을 설계하는 알고리즘과 설계된 전선의 특성을 검토해 보았다. 저손실 특성은 전선의 각 층에서 소선의외경과 피치의 상대적인 값에 의해 변화되어지며 외경과 피치의 여러 범위에서 최적값이 분포하고 있기 때문에 적절한 탐색과정이 요구된다. 설계된 저손실 전선은 기존 전선의 전기적·기계적 특성을 유지하면서 저손실화되었기 때문에 기존 선로에 부과장치나 장비없이 적용이 가능하다는 장점을 지니고 있다. 본 논문에서는 코어의 기하학적 치수를 변화시키지 않았지만 출력된 전선의 기계적인 특성을 검토하여 인장강도가 기존 전선에 비해 증가된 전선은 코어의 외경을 줄임으로써 도체의 단면적을 크게하여 허용전류를 증가시킬 수 있다. 이 과정이 설계프로그램에 적용된다면 저손실 중용량 전선의 제작도 가능할 것이다.

현재 국내의 전선제작현황은 단순히 규격에 의한 전선을 생산하는 단계이며 저손실 등과 관련된 새로운 전선 연구가 미진한 실정이다. 선로의 고전압·대전력화에 따른 송전선의 손실증가와 에너지절약 차원에서 향후 새로운 전선에 대한 연구가 시급한 실정이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] R.D. Findlay, "Analysis of Two Layer Aluminum Conductor Steel Reinforced", Paper C73 172-4, IEEE Winter Power Meeting, 1973
- [2] J.S. Barrett, O. Nigol et al.2, "A New Model of AC Resistance in ACSR Conductors", IEEE Trans., Vol. PWRD-1, No.2, Apr.1986
- [3] J.S. Barrett, "Optimization of Conductor Design", Vol.4.No.1, IEEE Trans. on Power Delivery, Jan. 1989
- [4] W.A.Lewis, P.D.Tuttle, "The Resistance and Reactance of Aluminum Conductors, Steel Reinforced", Paper 58-1029, AIEE Pacific General Meeting, 1958
- [5] V.T.Morgan, C.F.Price, "Magnetic properties in axial 50Hz fields of steel core wire for overhead-line conductors", Proc. IEE, Vol.116.No.10, oct. 1969