

송전선의 대용량 저손실화를 위한 구조적인 고찰

정 연호*, 이 형권*, 손 흥관*, 조 연규*, 김 종식**

*한국 전기연구소, **일진산업(주)

The Structure of the Overhead T/L for Lowering Power-Loss

Y.H. Jeong*, H.K. Lee*, H.K. Sohn*, Y.K. Cho*, J.S. Kim**

*KERI, **Iljin Industries

Abstract -Transmission capacity is becoming higher according to the increase of power demand. But construction of T/L is very difficult due to the securing of ROW and environmental problems. Then in order to consider efficient utilization of T/L, this paper suggests basic design methods of low-loss conductors.

알루미늄 피복의 두께에 의해 전선의 인장강도와 도전성이 변화되어 사용목적에 따라 다양한 특성을 얻을 수 있다.

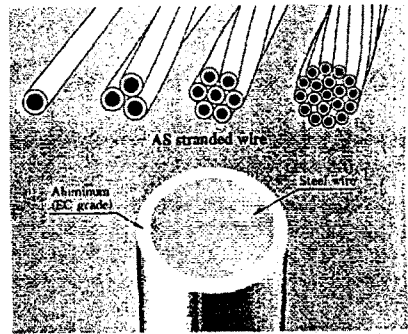


그림1. AS wire의 단면도

1. 서 론

국내는 전력수요의 꾸준한 증가로 인해 전력공급 선로의 계속적인 건설이 요구되고 있으나, 선로부지 확보난 및 환경제약 등으로 신규 송전선로의 건설에는 한계가 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 기존의 송전선로 또는 신규 송전선로 자체의 송전용량을 증대시키는 것은 매우 효과적이 될 수 있다.

이러한 방법은 표피효과에 의해 발생하는 손실이 제거 되도록 도체의 두께를 적절히 결정하거나 복합재료 제작된 소선을 다양하게 구성함으로써 대용량 저손실 효과를 얻을 수 있을 것으로 예측된다.

최근 미국, 러시아, 일본 등을 중심으로 가공송전선의 전력손실을 최소화하여 송전용량을 증대시키고자하는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이의 방안중의 하나로 송전용 전선을 저손실화 전선으로 대체하는 것이 제시되고 있으며 어느정도 성과를 거두고 있는 상태이다.

또한 송전선의 저손실화를 위해 소선의 배열과 도체의 형상을 AC/DC 저항비가 작도록 적절히 구성하여 전기적 손실을 줄이는 방법이 있다. 한 예로서 캐나다의 Nigol과 Barrett 등에 의해 제안된 손실해석기법이 있는데, 이 기법은 층의 단면적과 lay길이만으로 강심에서 발생하는 축방향의 자계를 계산할 수 있는 간단한 방법으로서, 이 기법을 이용하면 기존의 ACSR 도체에서 일률적으로 같은 크기로 구성된 알루미늄 소선을 다른 크기로 새롭게 조합시키고 lay길이를 조정함으로써 손실을 저감시킬 수 있다. 본 논문에서는 저손실화의 방법을 예시하기 위해 이 기법을 ACSR "Cardinal" 전선에 적용하여 손실이 감소된 도체모델의 한 예를 구성해 보았다.

따라서 본 논문에서는 송전선로의 용량을 증대시키기 위한 방안의 일환으로서 저손실 전선의 설계기법을 검토하고 이를 이용하여 저손실 전선의 기본적인 형상을 제시하여 보았다.

2. 송전선의 대용량 저손실화 기법

2.1 손실해석기법 개요

송전선의 대용량화란 같은 외경의 전선에서 허용전류의 증대를 의미한다. 이것은 도체의 기계적인 강도를 높여 전선의 열팽창으로 발생하는 이도문제를 해결하거나 심선의 도전성을 크게하여 전류용량을 높이는 방법이다 [1].

나선방향의 ACSR 소선에서 유효되는 전압은 식(1)로 나타낼 수 있다[2,3].

이러한 실례로 강심의 도전율을 높이거나 도체의 인장강도를 높이기 위해서 송전선에 적용되고 있는 소선의 한 예를 그림(1)에 예시하였다. 이는 송전선의 대용량화를 위해 일본에서 개발한 것으로서 소선을 두가지 이상의 재료로 결합시켜 전선의 기계적인 강도와 도전성을 높이도록 고안되었다. 현재 이 방법에 의해 개발된 AS (Aluminum-clad Steel wire) 전선은 냉간압연기법을 이용하여 제조되었는데, 강선에 알루미늄을 입힌 형태로서

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

도체의 단위길이당 전압강하는 소선들이 평행으로 구성

되어 있으므로 모든 층에서 같은 값을 갖는다. 따라서, 표피효과와 소선코일에서 발생하는 도체길이 증가를 무시하면 식(2)로 수정된다.

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

여기서,

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

- I_i : i 층에 흐르는 전류 [A]
- A_i : i 층의 단면적 [mm^2]
- a : steel core의 단면적 [mm^2]
- H : steel core에서의 축방향 자계
- l_i : i 층의 lay 길이 (left : -, right : +)

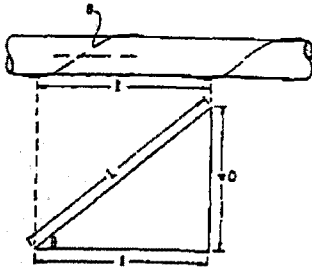


그림2. 도체의 lay 길이

식(2)의 첫항은 알루미늄의 저항율에 의해 발생하는 전압강하이고, 두 번째 항은 강심의 축방향 자계에 의해서 발생하는 유도성 전압강하이다. 만일 강심에서 발생하는 자계 H 가 균형을 이루도록 도체소선이 배열되었다면, 즉 $H = 0$, 식(2)는

$$V = \frac{\rho I_1}{A_1} = \frac{\rho I_2}{A_2} = \frac{\rho I_3}{A_3} \quad (4)$$

으로 되어, 전류밀도 I/A 는 도체의 모든 층에서 일정하며, 전류 I_i 는 면적 A_i 에 비례한다는 것을 의미한다. 따라서 식(3)은 식(5)로 수정되어 진다.

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

식(5)는 층의 단면적과 lay 길이만으로 도체의 손실해석이 가능하다는 것을 나타내며 식(5)에 만족하도록 도체가 구성된다면 AC/DC 저항비는 최소화될 것이다. Nigol 등은 시험에 의해 실제의 도체구성에서 H 의 값이 3층형상도체는 0.25, 2층형상도체는 0.1이하의 값을 갖도록 제안하고 있다. 일반적으로 ACSR도체의 AC 저항계산은 DC저항값에 표피효과와 강심의 손실을 보정하는 방법을 사용하는데 표피효과보정은 도체를 동공 알루미늄 튜브로 가정하여 결정되며[45], 강심에서의 히스테리시스와 와전류 손실은 보통 시험에 의해 결정되어진다[46,7].

이들은 또한 전선의 장력에 의해 발생하는 토크문제를 검토하기 위해 식(6)을 제안하여 토크 안정값으로 3층형상도체는 $1.0 d^3$ 이하, 2층형상도체는 $1.5 d^3$ 이하를 제시하고 있다.

$$\left| 100 \sum_{i=1}^n \frac{A_i D_i}{2} \cdot \cos^2 \theta_i \sin \theta_i \right| \leq 1.5 d^3 \quad (6)$$

여기서,

- n : 도체의 layer 수
- A_i : i 층의 단면적 [mm^2]
- D_i : i 층의 평균 지름 [mm]
- θ_i : i 층의 lay angle (left : -, right : +)
- d : 도체의 외경 [mm]

이러한 기법을 이용하여 Nigol 등은 몇가지 전선을 설계하였는데 그 형상은 일반적인 원형타입의 소선을 사다리꼴 모양으로 변형시키거나 층간의 소선굵기를 다르게 하여 전선의 전기적인 특성을 개선시키면서 전선에서 장력에 의해 발생하는 토크를 제거하였다.

2.2 저손실 전선의 모델

국내 선로에서 사용중인 ACSR 480 mm^2 "Cardinal"의 전기적, 기계적인 특성을 검토하기 위해 표(1)에 나타난 사양을 식(5)와 식(6)에 대입하여 전선의 강심에 분포된 축방향 자계와 불균형 토크를 계산해 보았다. 표(1)의 lay 길이는 Cardinal 전선표본에서 실측한 값이다.

표1. ACSR 480 mm^2 "Cardinal"의 사양

	1st Layer	2nd Layer	3rd Layer
cross sectional area [mm^2]	107.42	161.13	214.84
mean diameter of layer [mm]	13.504	20.256	27.008
lay length [mm]	245.3	-263.4	328.4
lay angle [deg]	9.81	-13.58	14.49
Stranding	Al.54/3.376, St.7/3.376		

계산결과 강심에서 발생하는 축방향의 자계는

$$H = \frac{A_1}{l_1} + \frac{A_2}{l_2} + \frac{A_3}{l_3} = 0.48$$

이고, 장력상태에서 전선의 불균형 토크는

$$T_q = \left| 100 \sum_{i=1}^n \frac{A_i D_i}{2} \cdot \cos^2 \theta_i \sin \theta_i \right| = 1.56 d^3$$

으로, Nigol등이 시험을 통해 산출하여 송전선이 양호한 특성을 갖기 위한 조건으로 제안한 값인 $H \leq 0.25$, $T_q \leq 1.0 d^3$ 와 비교해 볼 때 낮은 값으로 나타났다. 이 값을 개선시키기 위해 식(5)와 식(6)을 기본식으로 ACSR "Cardinal"에 적용하였다.

먼저 소선의 지름, 도체의 외경을 고정시키고, lay 길이만을 표2(KEPCO규격의 전선 최소/최대 lay 길이)의 범위 내에서 조정하여 축방향 자계와 불균형 토크값이 양호한 lay 길이를 검토하였다.

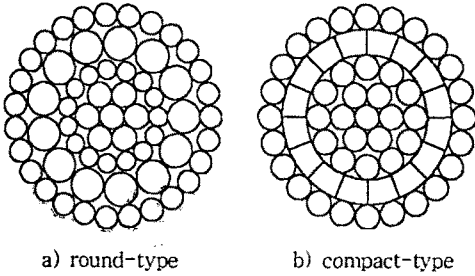
표2. 전선 layer에 따른 lay length (D_i 의 배수)

	1st Layer	2nd Layer	3rd Layer
2 Layer	10~16	10~14	
3 Layer	10~17	10~16	10~14

계산결과 Cardinal전선의 1, 2, 3층에서 lay 길이를 각각 평균지름의 17배, 10배, 14배로 설정하였을 때 축방향의 자계는 0.19, 불균형 토크는 $0.907 d^3$ 로서 lay 길이를 수정하기 전의 값에 비교하여 축방향 자계와 불균형 토크가 양호한 값을 나타내었다.

또한 도체의외경과 강심은 변화시키지 않고, 소선의 굵기와 lay 길이만을 조정하여 축방향 자계에 의한 손실과

불균형 토르크를 감소시킨 모델의 한 예로서 본 논문에서는 그림(3-a)와 그림(3-b)와 같이 기본형상설계를 하였다. 이 모델은 그림4의 설계흐름도와 같은 순서로 Nigol 등이 제안한 특성식을 이용하여 설계한 것이며, 축방향 자계와 불균형 토르크값이 양호한 결과를 나타내도록 각 층에서 소선의경, 소선 수, 단면적, lay 길이 등을 적절히 수정하여 설계한 것이다.



a) round-type b) compact-type
그림3. ACSR "Cardinal" 전선의 저손실화 모델

그러나 보다 성능이 개선된 전선모델을 설계하기 위해서는 형상수정의 알고리즘에 최적화기법이 도입되어야 한다. 저손실화 전선모델로 설계된 그림(3)의 소도체 구성과 축방향 자계, 불균형 토르크를 표3과 표4에 나타내었다. 특히 그림(3-b)의 모델은 2층의 소선을 압축형태로 변형하여 도체의 전류용량을 높인 모델로 원형형태의 도체에 비해 저손실화 설계가 용이하였다.

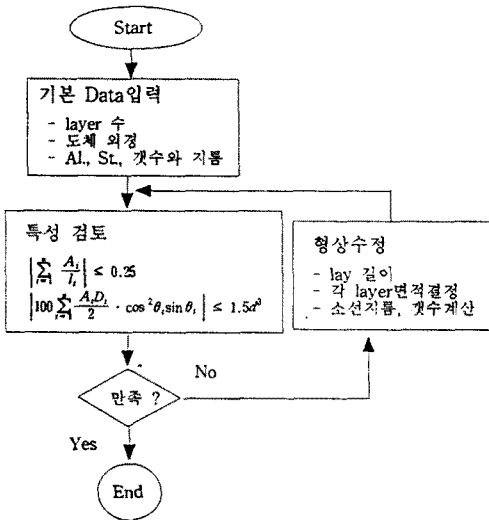


그림4. 전선의 저손실화 설계흐름도

표3. round-type 도체의 사양과 특성치

	Inner	Middle	Outer
단면적 [mm ²]	77.208	208.413	197.267
평균지름 [mm]	12.688	19.766	27.334
lay length [mm]	190.32	-237.19	355.342
lay angle [deg]	11.83	-14.67	13.59
Stranding	Al.15/2.56, 13/4.518, 27/3.05 St. 7/3.376		
특성치	H = 0.0821, Torque = 0.25 d ³		

표4. compact-type 도체의 사양과 특성치

	Inner	Middle	Outer
단면적 [mm ²]	107.42	214.84	214.84
평균지름 [mm]	13.504	20.256	27.008
lay length [mm]	253.5	-263.4	406.38
lay angle [deg]	9.51	-13.58	11.8
Stranding	Al.12/3.376, 16/(3.376), 24/3.376 St. 7/3.376		
특성치	H = 0.14, Torque = 0.72 d ³		

3. 결 론

송전선을 대용량 저손실화시키는 가장 좋은 방법은 도전성과 기계적인 강도가 뛰어나며 열팽창계수가 낮은 소재의 개발이다. 그러나, 소재의 연구개발에는 한계성이 있기 때문에 재료분야의 기초연구와 더불어 송전선이 최대의 성능을 갖도록 전선구조의 최적화에도 연구가 진행되어야 할 것이다.

이와 관련하여 본 논문에서는 송전선의 대용량 저손실화에 대한 연구개발 방향의 일환으로 전선의 저손실화 형상구성을 위해 Nigol 등이 제안한 특성식을 ACSR "Cardinal" 전선에 적용하였고, 강심에서 발생하는 축방향의 자계와 불균형 토르크의 계산결과가 낮은 값으로 나타났으며 이를 개선시키기 위해 원형형태와 압축형태의 기본적인 전선 모델을 제시하여 보았다. 그러나, 그림3의 형태로 설계된 저손실 도체의 모델에는 저손실화와 장력 인가상태에서 발생하는 불균형 토르크만이 고려되었기 때문에 보다 구체적인 설계를 위해서는 표피효과와 열팽창 등에 의한 손실이 보정되어야 하고, 실제 제작에서 발생할 수 있는 선재벌어짐과 같은 전선 형상유지의 문제점 등도 추가로 검토해야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 電氣協同研究會, "電氣協同研究", 第43卷 3號, 1月 1988
- [2] R.D. Findlay, "Analysis of Two Layer Aluminum Conductor Steel Reinforced", Paper C73 172-4, IEEE Winter Power Meeting 1973
- [3] 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
- [4] H.B. Dwight, "Skin Effect and Proximity Effect in Tubular Conductors", AIEE Trans., Vol 41, pp.189-198, 1922
- [5] W.A. Lewis, P.D. Tuttle, "The Resistance and Reactance of Aluminum Conductors, Steel Reinforced", AIEE Trans., II, Vol.77, pp.1189-1210, 1958
- [6] Aluminum Electrical Conductor Handbook, the Aluminum Association, 2nd Edition, 1982
- [7] L.W. Matsch and W.A. Lewis, "Magnetic Properties of ACSR Core Wire", AIEE Trans. II, pp.1178-1189, Feb. 1969