

저손실·대용량 송전선 설계 및 제작기술 동향
 The Technology of the Overhead Power Transmission
 Line with Low Loss and High Current Ability

변우봉*, 김병걸, 이형권

한국전기연구소 전기재료연구부, 전력계통연구부

Byun Woo-Bong, Kim Byung-Geol, Lee Hyung-Kwon
 Korea Electrotechnology Research Institute

1. 서 론

꾸준한 경제성장과 국민복지 생활수준의 향상등으로 전력수요가 년평균 10%이상으로 성장하여 왔으며 앞으로의 이러한 추세는 당분간 지속될 전망이다. 그러나 전력수송설비의 증설이나 신규건설은 부지 확보난과 환경제약 등의 문제로 추진에 많은 어려움이 발생할 뿐만 아니라 국토의 효율적인 이용, 에너지의 효율적인 이용 및 환경적인 측면에서 많은 문제를 야기시킬 수 있다. 따라서 이와같은 문제를 해결하기 위한 방안중의 하나가 선로의 전력수송을 담당하는 전선의 용량을 증대시키고 손실을 줄이는 것이다. 이러한 노력의 일환으로 일본, 미국 등의 선진국에서는 1000kV 급 초고압 기술등에 많은 투자가 이루어지고 있으며, 국내에도 765kV급에서 800kV급으로 용량 증대에 박차를 가하고 있는 실정이다. 최근에 미국이나 러시아를 중심으로 가공송전선의 효율을 증대시키고자 하는 연구가 활발히 이루어져 어느정도 성과를 거두고 있으며, 몇몇 아이디어와 그 방향이 제시되어 주목을 끌고 있다. 본 논문의 목적은 송전선의 용량증대와 전력손실을 감소시킬 수 있는 최근의 연구 결과들을 소개하는 것이다.

2. 이론적 배경

현재 국내외적으로 많이 사용되고 있는 고전압 송전선은 ACSR(Aluminun conductor steel reinforced)이며, 이것은 중심부의 steel core와 그 주위를 단면적이 300~600 sq.mm인 3개의 알루미늄 층(layer)으로 구성되어 있는 conductor 구조로 되어있다. 이러한 conductor에서 모든 알루미늄 선(wire)은 같은 굵기를 가지고 있고, 각각의 알루미늄 층에서 wire의 수는 중심부의 첫번째 층으로부터 바깥쪽으로 6개씩 증가한

다. 여기서 첫번째와 세번째 알루미늄 층의 암페어수(ampere turns)의 합은 두번째 층의 암페어수의 거의 두배이고, 방향은 반대이다. 이러한 송전선(3층의 ACSR)의 경우에 steel core는 위와 같은 알루미늄 전도체의 구조에 의하여 발생하는 자속(magnetic flux)에 의하여 자화(magnetization)되며, 알려진 실험 데이터[1,2]에 따르면 첨가적인 전력손실은 전류용량에 따라 3~15%에 이른다(표1). 다시 말하면 전도체에서 AC 유효저항(Rf)는 전도체 층의 구조에 의존하게 되는데, 상용 주파수(50, 60Hz)에서 전력 손실계수(AC 저항대 DC저항비, Rf/Ro)를 결정하는 주된 요소는 steel core에서 길이방향의 자속이다. 길이방향의 자속은 i) steel core에서 자기이력현상(hysteresis)과 와전류(eddy current)에 의한 전력손실과 ii) 전도체에서 비규칙적인 전류분포에 의한 전력손실로서 나타난다.

Table 1. Dependence additional losses in modified and standard conductors, %

Sort of the Conductor	Current, A							
	100	200	300	400	600	800	1000	1200
ACM 400/51	0.6	0.5	0.5	0.5	0.8	1.3	1.4	1.3
ACM 330/43	0.6	0.7	0.4	0.7	0.5	0.9	0.7	0.3
AC 400/51	4.3	4.7	5.2	5.8	7.9	11.2	12.7	12.7
AC 330/43	2.3	2.9	3.6	5.6	7.7	10.5	11.1	11.2

또한 3개의 알루미늄 층을 갖는 전도체는 알루미늄 wire의 직경에 제한을 받게 되는데, 알루미늄 wire의 직경이 4.5 mm 를 초과시 wire의 강도는 감소되고 1.5mm 이하일 경우에는 알루미늄 wire의 제조공정상 복잡해 진다. 따라서 1.5~4.5mm범위의 알루미늄 직경을 갖는 3-layer ACSR에서는, 알루미늄의 직경에 따른 기계적 강도를 고려하여 전력손실을 최소로 줄

이는 것은 매우 중요하다. 이러한 전력손실을 줄이는 방법은 크게 2가지로서 i) 자속에 의한 코아에서의 전력손실을 줄이기 위하여 길이방향의 자속을 보상하는 방법과 ii) 자성강인 코아를 비자성강으로 대체하는 것이다.

2-1 자속을 보상하기 위한 Al-wire의 설계

자속을 보상하기 위해서는 서로 다른 방향의 알루미늄 층의 총 단면적 사이의 차이를 줄이는 것이 필요하다[3]. 즉, 각각의 알루미늄 층들에 있어서 직경이 다른 wire를 사용하는 것이다. 예를들면 알루미늄의 첫번째와 세번째 층에서 wire의 감소와 두번째 층의 알루미늄 wire의 상대적인 증가이다. 이 경우 내부의 알루미늄의 첫번째 층에서 상대적으로 전류의 감소에 의하여 steel core에서의 자속에 대한 보상은 전체적으로 conductor 저항의 감소결과를 가져오게 한다. 여기서 자속에 대한 충분한 보상조건은 다음과 같은 기준에 의해서이다.

$$0 < \sum_{m=1}^n (-1)^m m S_m W_m < \frac{B}{\delta_e \mu_r} \quad (1)$$

- 여기서, n : number of aluminium wire layers
- m : number of layers
- S_m : total area of the cross section of the m-layer (sq.m)
- W_m: number of lays on 1m of the m-layer length (1/m)
- B= 2 · 10⁵ A/m (a constant factor)
- δ_e : economical current density (A/sq.m)
- μ_r : max. relative permeability of the steel wires in longitudinal direction

이 경우에 코아에서의 자장밀도는 재료의 투자율(permeability)을 야기시키는 임계 값 H_{cr}를 초과하지 않고 자기이력손실의 각(angle)은 증가하는데, 이는 자화의 유사성에 따라 다른 steel의 [B-H] 곡선이 b/μ_r ≈ H_{cr}이기 때문이다.

Olaf Nigol[3] 등은 식(1)의 기준에 의한 전자기와 기계적 계산을 통하여 개량된 3-layer steel-aluminum conductor의 설계를 하였고, "Irkutsk-cable" plant에서 실험시편을 제작하여 표준품과 비교시험을 행하였다. 여기서 AC400/51과 AC330/43은 선택된 표준품이고, ACM400/51과 ACM330/43은 새롭게 개량된 conductor들이다. 표2는 개량된 것과 표준품에 대한 구조적인 특징(wire의 수 "n" 와 직경 "d")을

나타낸 것이며, 그들의 단면 형상을 그림 1에 각각 나타내었다. 표1은 50Hz의 주파수, 20℃의 온도에서 전류값에 따른 첨가적인 손실값을 %로 나타낸 것으로 전력손실은 전류에 의존하며, 개량된 conductor는 표준품보다 약 1.6~11.4% 정도 부가손실(additional loss)이 더 낮게 나타남을 알 수 있다. 또한 같은 조건(동일재료, 동일부피)에서 개량된 conductor는 DC 저항이 2% 정도 감소한다. 이렇듯 상용 주파수에서 개량된 conductor로 가공송전선으로 사용시 전력손실은 총 4~13% 감소한다.

Table 2. Construction of the modernized conductors and their standard analogies

Sort of the conductor	Aluminium part of the conductor						Steel core	
	1st layer		2nd layer		3rd layer			
	n	d, mm	n	d, mm	n	d, mm	n	d, mm
ACM 400/51	17	2.00	13	4.05	24	3.11	7	3.05
ACM 330/43	17	1.84	13	3.72	24	2.85	7	2.8
AC 400/51	12	3.05	18	3.05	24	3.05	7	3.05
AC 330/43	12	2.8	18	2.8	24	2.8	7	2.8

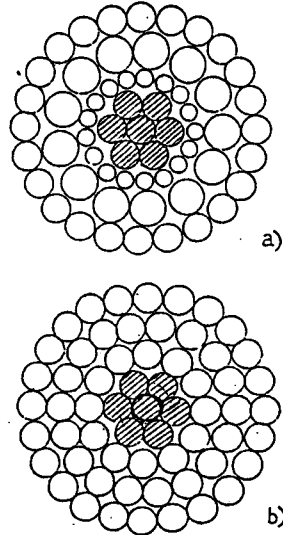


Fig. 1. Cross section of (a) modernized and (b) standard 3-layer conductor.

2-2 비자성 steel core

Steel-aluminium conductor에서 유효저항을 감소시킬 수 있는 또다른 가능한 방법은 steel core를 비자성 또는 low-magnetic steel로 사용하는 것이다. 이 경우에 코아에 의해 야기되는 부가 전력손실은 알루미늄 층의 수와 구조 등의 인자들에 관계없이 무시되어질 수 있다. 즉, 알루미늄 층의 제약이 없어질 뿐만

아니라 유효저항의 감소도 크다. Steel core에서의 문제점으로는 현재 사용되는 자성체의 탄소강(carbon steel)을 대체할 수 있는 좋은 물리적, 기계적 성질을 가지고 있으면서 경제성이 있는 비자성 합금강을 만드는 것이다. 여러가지 합금강중 질화강(nitrogen steel)은 가장 가능성이 높은 재료로서 많은 연구의 대상이 되고있다. 러시아에서는 이러한 질화강의 특성 뿐만 아니라 상업적인 생산까지도 거의 완료단계에 이르고 있어 앞으로의 추이에 관심을 불러오고 있다.

질화강은 거의 stainless steel 조성에서 비자성인 오스테나이트(austenite) 영역을 확장시키고 안정화시키기 위해 질소를 약 0.2~0.5wt% 정도 함유한 합금강으로서, 부식저항이 높아 탄소강에서의 zinc plating 과 같은 내부식성 코팅이 필요가 없다. 표3은 송전선에 steel core로서 제조된 질소강과 탄소강의 주요한 기계적, 물리적 특성을 나타낸 것이다. 또한 질화강의 기계적 성질은 그림2에 나타난 것처럼[4] 질소의 함유량에 따라 차이를 나타내고 있으며, 같은 소성성질을 가질때 질소강으로 만들어진 wire는 탄소강보다 더 좋은 강도(200kg/sq.mm까지)를 갖을 뿐만 아니라, 강도를 감소시키지 않을 정도의 허용온도와 열용량을 가지고 있기 때문에 쇼트전류나 낙뢰에도 견딜수 있는 열저항성을 향상 시킬 수 있다.

전력손실 측면에 있어서는, steel core를 질소강으로 대체시 상대적인 단면적과 유효저항은 15~20% 만큼 감소되어질 수 있기 때문에 전류수송 능력은 10~15% 만큼 증가되어질 수 있다.

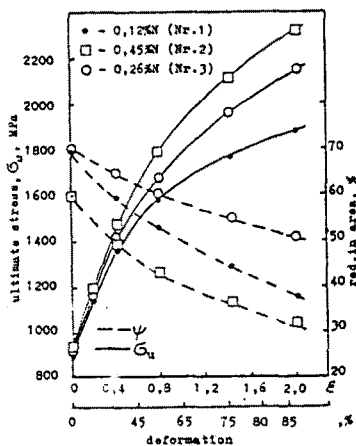


Fig. 2. An influence of nitrogen contents on the mechanical properties of nitrogen-alloyed steels.

Table 3. The physicochemical characteristics of nitrogen and carbonic steel.

Characteristic	Nitrogen steel	Carbonic steel
Specific weight	7.7	7.8
Resistivity at 20°C	0.8	0.2
Relative permeability	1	70~550
Thermal resistance coefficient, 1/°C	0.001	0.003
Specific heat	5.1	3.6
Ultimate resistance	170~200	120~130
Elastic modulus	20.5 · 10 ³	20 · 10 ³
Permissible temperature, °C	600	400
Coefficient of linear thermal expansion 1/°C	15 · 10 ⁶	12 · 10 ⁶

3. 맺음말

이 논문에서는 차기 초고압에 대비한 대용량·저손실 송전선의 설계 및 신소재로의 질소강에 대한 최근의 결과를 소개하였다.

국내의 에너지 사정과 환경문제 등을 고려하여 앞으로의 800kV, 1000kV급으로의 송전용량의 증대를 위해서는 이러한 송전선의 기술들은 필수적이다.

참 고 문 헌

- [1] W.A.Lewis, P.D.Tuttle. The Resistance and Reactance of Aluminium Conductors Steel Reinforced. AIEEE Transactions Power Apparatus and Systems. Vol. 77, February, 1958.
- [2] I.S.Barret, O.Nigol, C.I.Fehervari, R.D.Findlay. A New Model of AC Resistance in ASCR Conductors. IEEE Transactions on Power Systems, V.PWRD-1, No 2, 1986.
- [3] USA-patent No 4673775.
- [4] V.G.Gavrilyuk, V.A.Duz, S.P.Jphimenko. The Structure and Mechanical Properties of Cold Worked High nitrogen Austenite. Proc.2nd Int.Conf. "High Nitrogen Steels", Aachen, 1990, pp. 100-103.