

Analysis of Eddy Current Loss Considering Interaction Effect in Metal Sheath of 154 kV Three Phase Power Cable

154 kV 3상 전력 케이블의 상호작용에 따른 금속 Sheath에서 발생하는 와전류 손실 분석

Sang Hyeon Im, Ki Byung Kim, Gwan Soo Park
임상현, 김기병, 박관수

Abstract

In order to accurately predict the losses in the power cable, analysis of the eddy current losses in the metal sheath is required. The copper loss is easily calculated by the resistance and current of the conductor, but it is difficult to measure and predict the eddy current generated from the metal sheath. For this purpose, the previous study analyzed the eddy current loss in single phase cable, but there is a limit to apply it because three phase cables are used in real environment. Therefore, in this paper, the eddy current loss occurring in the metal sheath of three phase cable according to the cause was analyzed theoretically. In addition, the eddy current loss occurring in the triangular and horizontal array were predicted through electromagnetic numerical analysis.

전력 케이블에서 발생하는 손실을 정확히 예측하기 위해서는 금속 시스에서 발생하는 와전류 손실에 대한 분석이 필요하다. 동손의 경우 도체의 저항과 전류에 의하여 쉽게 계산이 되지만 금속 시스에서 발생하는 와전류의 경우 측정 및 예측이 어렵기 때문이다. 이를 위하여 선행연구에서는 단상 케이블에서 발생하는 와전류 손실을 분석하였지만 실제 환경에서는 3상이 대부분 사용되기 때문에 적용하기에는 한계가 존재한다. 그러므로 본 논문에서는 3상 케이블의 금속 시스에서 발생하는 와전류 손실에 대하여 발생 원인에 따라 이론적으로 분석하고 전자기 수치 해석을 통하여 삼각 배열과 수평배열에서 발생하는 와전류 손실을 예측하였다.

Keywords: Eddy Current Loss, FEM, Finite Element Method, Power Cable, Sheath

1. Introduction

최근 전체 전력 계통에서의 효율 향상을 위한 연구에 대한 관심이 높아짐에 따라 전력 케이블에서 발생하는 손실의 예측이 중요해지고 있다 [1]-[3]. 케이블에서 발생하는 손실은 도체에서 발생하는 동손과 금속 시스에서 발생하는 와전류 손실이 있다. 동손의 경우 도체의 저항과 전류에 의하여 손실이 계산되어 지지만 금속 시스에서 발생하는 와전류의 경우 실제 측정이 불가능하기 때문에 전자기 해석과 같은 분석을 통한 예측이 필요하다.

금속 시스에서 발생하는 와전류의 경우 페러데이 법칙에 따라 도체에 흐르는 교류 전류에 의해 발생하는 자기장이 금속 시스에 쇄교하며 이를 저감하기 위한 방향으로 발생하게 된다 [4][5]. 선행 연구를 통하여 단상에서 발생하는 와전류 손실과 예측 기법은 분석이 되었다. 하지만 실제 현장에 사용되는 케이블의 경우 대

부분이 3상이기 때문에 실용적인 측면에서 많은 한계가 있다.

단상에서는 도체에 흐르는 전류에 따라 발생한 자기장이 원주 방향으로 금속 시스에 쇄교하게 되고 이를 저감하기 위한 방향으로 와전류가 발생하게 된다. 하지만 3상에서는 단상과 같이 원주 방향으로 쇄교하는 자기 성분 외에도 다른 상에서는 금속 시스의 수직방향으로 쇄교하는 상호 성분이 존재하게 된다. 이에 따라 단상과는 다른 크기와 방향을 가지는 와전류가 발생하게 된다. 그러므로 실제 전력 계통에서 사용되는 3상 케이블의 금속 시스에서 발생하는 와전류 손실을 정확히 예측하기 위해서는 자기 성분과 상호 성분 모두를 고려하여야 한다.

본 논문에서는 발생 원인에 따른 와전류 손실에 대하여 이론적으로 분석하고, FEM (Finite Element Method) 전자기 해석을 통하여 배열에 따른 3상 케이블의 금속 시스에서 발생하는 와전류의 분포와 손실을 분석하였다. 실제 현장에서 사용되는 154 kV 케이블

Article Information

Manuscript Received January 30, 2020, Revised March 17, 2020, Accepted March 30, 2020, Published online December 30, 2020

The authors are with Lab. of Applied Electro Magnetics, Pusan National University, 2 Busandaehak-ro 63beon-gil Geumjeong-gu, Busan, 46241, Republic of Korea.

Correspondence Authors: Sang Hyeon Im (ish@pusan.ac.kr), Gwan Soo Park (gspark@pusan.ac.kr)

ORCID: 0000-0003-0589-275X (S. H. Im); 0000-0001-9349-2168 (K. B. Kim); 0000-0002-6950-8836 (G. S. Park)



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License.

To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepcoco.kr>.

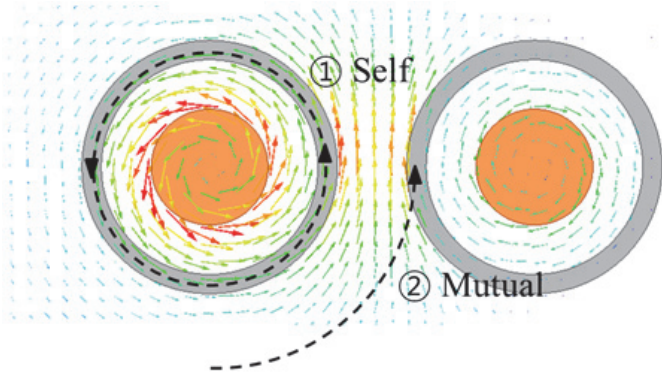


Fig. 1. Silicone rubber 적용에 따른 부착방지성능 평가(Tack test).

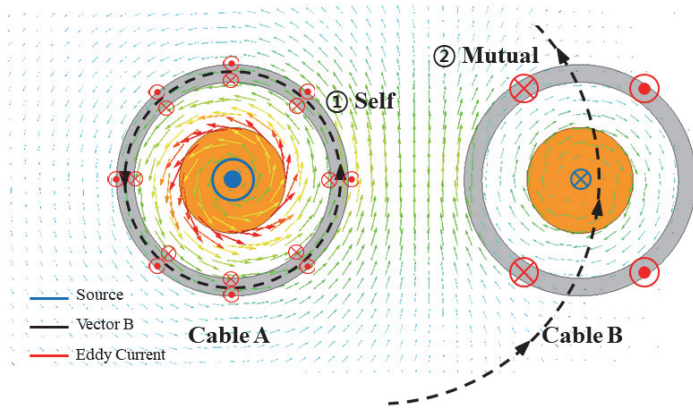


Fig. 2. 발생 원인에 따른 발생하는 와전류.

블을 모델링하고 정적 전류를 인가하였다. 먼저, 수평 배열을 이용하여 자기 성분보다 상호 성분이 와전류 발생에 중요하다는 것을 분석하였다. 다음으로 FEM 전자기 해석을 통하여 수평 배열과 삼각 배열의 각 상에서 발생하는 와전류 밀도 분포를 분석하고 손실을 예측하였다.

II. 154 kV 케이블의 금속 시스에서의 손실 원인 분석

전력 케이블의 금속 시스에서는 도선에서 흐르는 전류에 의하여 와전류가 발생하게 되는데 Fig. 1과 같이 해당 케이블에서 발생하는 자기장에 의한 와전류와 다른 상의 케이블에서 발생하는 자기장의 상호 영향에 의한 원인 두 가지가 있다.

Fig. 2에서는 발생 원인에 따라 발생하는 와전류에 대하여 나타냈다. 먼저, 자기 영향에 의한 와전류 손실은 선행 연구를 통하여 연구가 수행되어 왔다. Fig. 1에서 왼쪽 도체를 A상, 오른쪽 도체를 B상으로 가정할 경우, A상에 흐르는 전류에 의하여 도체 주위에 원주 방향으로 자기장이 발생하게 되고 도전물을 가지는 금속 시스에서는 교변하는 자기장의 변화에 의하여 와전류가 발생하게 된다. 따라서 와전류는 금속 시스의 내측과 외측에서 각각 들어가고 나오는 형태로 나타난다.

반면 상호작용에 의해 발생하는 와전류는 다르게 발생하게 된다. A상에 전류가 흐르게 되면 B상의 금속 시스에는 A상에서 발

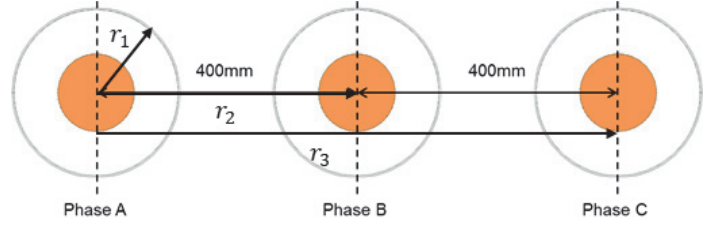


Fig. 3. 수평 배열 등가 모델.

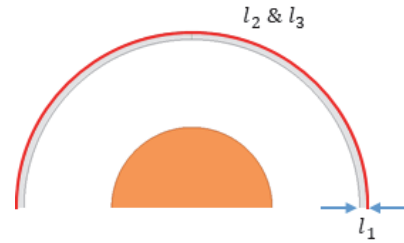


Fig. 4. 수평 배열에서 한 상의 등가 모델.

생한 자기장이 시스의 수직 방향으로 인가되고 이에 대한 변화를 저감하기 위하여 금속 시스에서는 시스의 둘레의 절반씩 나누어 와전류가 흐르게 된다.

이와 같이 두 가지의 원인에 의하여 금속 시스에서는 다른 형태의 와전류가 발생하게 되고 손실이 일어난다. 그러므로 전력계통에서 정확한 효율을 예측하기 위해서는 각 상에서의 와전류 손실 뿐 아니라 상호 영향에 따른 와전류 손실에 대한 정확한 예측이 필요하다.

본 논문에서는 3상 154 kV 전력 케이블의 금속 시스에서 발생하는 와전류 손실을 분석하기 위하여 유한요소법을 이용한 전자기 해석을 수행하였다. 실제 현장에서 사용되는 케이블의 길이는 수천 km이기 때문에 케이블의 길이에 따른 영향을 무시 가능하므로 길이가 무한한 2D FEM 해석을 수행하였다. 먼저 자기 성분과 상호 성분에 의해 발생하는 와전류의 크기에 대하여 비교 분석한 뒤 삼각 배열과 수평 배열에서 발생하는 전체 와전류 손실에 대하여 분석하였다.

III. 전력 케이블의 금속 시스 모델링 및 와전류 해석

A. 상호 성분에 의한 와전류 분석

상호 성분과 자기 성분에 의한 와전류의 크기를 분석하기 위하여 Fig. 3과 Fig. 4와 같이 각 길이를 변수로 설정하였다. A상 도체에서 흐르는 전류에 의한 자기장의 크기는 Eq. (1)과 같이 거리에 반비례하게 된다. r_1 는 도체 중심으로부터 시스까지의 거리인 57.7 mm이고, r_2, r_3 는 도체 간의 거리로써 각각 400 mm, 800 mm이다. 자기장이 쇄교하게 되는 면적은 Eq. (2)와 같이 길이에 비례하게 되는데 A상에서 발생하는 자기장이 A상의 금속 시스에 쇄교하는 면적은 l_1 에 비례하고, A상의 자기장이 B상의 금속 시스에 쇄교하는 면적은 l_2, l_3 에 비례하게 된다. l_1 는 시스 두께인 2.6 mm이고, l_2, l_3 는 시스의 원주의 절반이므로 185.3 mm가 되어 매우 길어지게 된다.

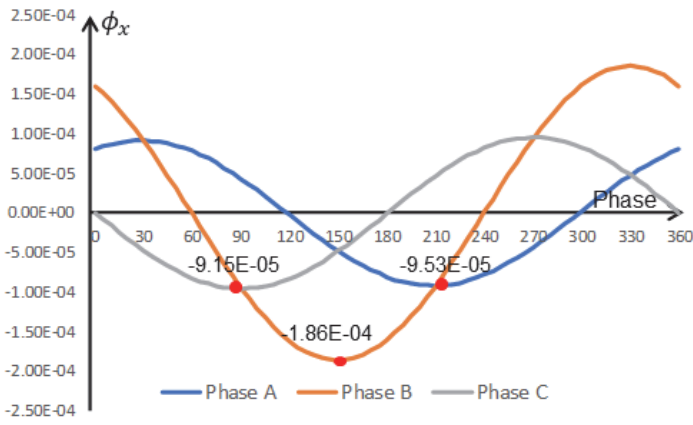


Fig. 5. 수평 배열에서 각 상에 쇄교하는 자속.

TABLE 1

A상에 전류가 흐를 경우, 금속 시스에서 발생하는 와전류 손실			
	Phase A	Phase B	Phase C
와전류 손실	23 W/km	518 W/km	132 W/km

TABLE 2

수평 배열인 경우 금속 시스에서 발생하는 와전류 손실			
	Phase A	Phase B	Phase C
와전류 손실	432 W/km	1,570 W/km	401 W/km

TABLE 3

삼각 배열인 경우 금속 시스에서 발생하는 와전류 손실			
	Phase A	Phase B	Phase C
와전류 손실	4,335 W/km	4,335 W/km	4,335 W/km

$$B \propto \frac{1}{r} \quad (1)$$

$$S \propto l \quad (2)$$

와전류의 발생 원인이 되는 금속 시스에 쇄교하는 자속은 Eq. (3)과 같이 자속밀도와 면적의 곱으로 결정되게 된다. 각상의 시스에서 쇄교하는 자속을 Φ_1, Φ_2, Φ_3 라고 하고 자속밀도와 면적의 비에 따라 관계를 분석하게 되면 Eq. (4)와 같이 Self 성분인 Φ_1 에 비하여 C상에 미치는 상호 성분인 Φ_3 가 더 크게 발생하고 B상에 미치는 성분은 매우 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 그러므로 3상 전력 케이블의 금속 시스에서 발생하는 와전류 손실을 분석하기 위해서는 Self 성분보다는 상호 성분이 중요하다.

$$\Phi = B \cdot S \quad (3)$$

$$\Phi_1 \ll \Phi_2 \ll \Phi_3 \quad (4)$$

TABLE 1은 A상에서 전류가 흐를 경우 각상의 금속 시스에서 발생하는 와전류 손실에 대하여 FEM 해석을 수행한 결과이다. 자기 성분에 의한 와전류 손실인 A상에서는 23 W/km가 발생하였고, 상호 성분에 의해 발생하는 B, C상에서는 각각 518, 132 W/km가 발생하였다.

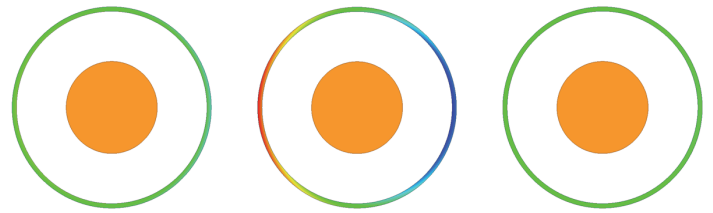


Fig. 6. 수평 배열에서 발생하는 와전류 밀도 분포.

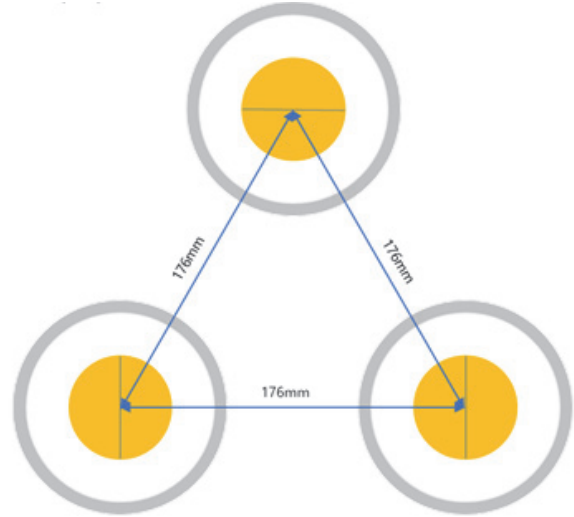


Fig. 7. 삼각 배열 해석을 위한 모델링.

B. 수평 배열에서의 와전류 손실 분석

수평 배열에서의 전체 와전류 손실을 분석하기 위하여 그림 3의 모델링에서 각 상에 120도 위상 차이를 가지는 정격 전류를 인가하였다. 먼저 Fig. 5와 같이 각상에서 와전류를 발생하게 되는 쇄교 자속을 비교하였다. A상과 B상의 경우 비슷한 쇄교량을 가지고 B상은 약 2배 많은 자속이 쇄교된다. 이러한 쇄교 자속에 의해 발생하는 와전류 밀도 분포를 Fig. 6에서 나타냈다. 쇄교 자속량이 큰 B상에서는 큰 와전류가 발생하는 것을 알 수 있다.

TABLE 2는 각 상에서 발생하는 와전류 손실을 나타냈다. A상과 C상에서는 각각 432, 401 W/km가 발생하였고, B상에서는 약 4배 큰 1,570 W/km가 발생하였다. B상에 쇄교하는 자속량이 약 2배 많았기 때문에 전체 손실의 크기는 4배가 커지게 된다.

C. 삼각 배열에서의 와전류 손실 분석

Fig. 7은 3상 전력 케이블의 삼각 배열에 대한 FEM 해석 모델링을 나타냈다. 수평 배열에 비하여 삼각 배열의 경우 케이블 간의 거리가 가까워지고 각 상간의 거리는 동일하게 위치한다.

Fig. 8은 수평 배열과 동일한 전류를 인가하였을 때 삼각배열에서 발생하는 와전류 밀도 분포를 나타냈다. 수평 배열의 경우 각상간의 자기적 거리가 동일하지 않기 때문에 B상에서 와전류 손실이 가장 크게 나타나게 되었다. 하지만 삼각 배열의 경우 상간의 자기적 거리가 동일하기 때문에 와전류 손실이 동일하게 발생한다.

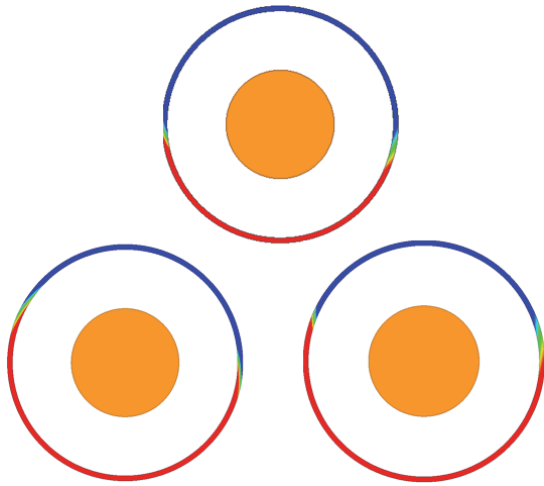


Fig. 8. 삼각 배열에서 발생하는 와전류 밀도 분포

또한 삼각 배열의 경우 수평 배열에 비하여 케이블 간의 거리가 가깝기 때문에 상호 영향이 증가하여 와전류 손실이 매우 커지게 된다. 각상에서 발생하는 와전류 손실의 크기는 4,335 W/km이다.

IV. Conclusion

본 논문에서는 3상 154 kV 전력 케이블에서 정격 전류가 흐를 경우, 금속 시스에서 발생하는 와전류 손실에 대하여 발생 원인에 따라 이론적으로 분석하고 전자기 해석을 통하여 검증하였다. 상에 흐르는 도체 전류의 자기 영향에 따라 발생하는 와전류 손실보다 상호 영향에 의해 발생하는 와전류 손실이 더욱 크게 발생한다. 이에 따라 단상에서 발생하는 와전류 손실보다 3상에서 발생

하는 와전류 손실이 많이 발생하게 되었다. 또한 수평 배열보다 삼각 배열이 상간의 거리가 가깝기 때문에 와전류 손실이 더욱 크게 발생하였다. 이러한 결과를 이용하여 실제 154 kV 3상 케이블의 금속 시스에서 발생하는 와전류 손실을 예측할 수 있고, 전체 전력 계통에서의 송전 효율을 향상시키기 위한 연구에도 활용될 수 있을 것이다.

Acknowledgment

This work was supported by Korea Electric Power Corporation under Grant R17XA05-25.

본 연구는 한국전력공사의 2016년 선정 기초연구개발과제 연구비에 의해 지원되었음 (과제번호: R17XA05-25).

References

- [1] 한국전력공사 전력연구원 송배전연구소, "변전소 근단고장시 고장전류에 의한 154kV 지중 송전케이블 영향분석 및 방지대책 최종보고서", Jul. 2009.
- [2] 송혜은, 임상현, 김경윤, 박관수 "Analysis of Eddy Current and Hysteresis Loss Distribution from Fixing Structure of 154 kV Underground Transmission Cable", KEPCO Journal on Electric Power and Energy, Vol. 4, No. 1, pp. 9-12. Jun. 2018., DOI 10.18770/KEPCO.2018.04.01.009.
- [3] D. S. Hong, H. J. Kim, S. M. Park, W. S. Chang, H. S. Park, T. I. Jang, J. W. Kang, "The Analysis of the Electrical and Mechanical Effects for Underground Cable and Fittings by Electromagnetic Force," IEEE T&D Asia, pp.1-5, 2009.
- [4] W. Moutassem, G. J. Anders, "Calculation of Eddy Current and Hysteresis Losses in Sheathed Cables Inside a Steel Pipe," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 25, No. 4, pp. 2054-2063, Oct. 2010.
- [5] M. Majoros, M. D. Sumption, M. A. Susner, M. Tomsic, M. Rindfleisch, E. W. Collings, "AC Losses in MgB2 Multifilamentary Strands with Magnetic and Non-Magnetic Sheath Materials," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 19, No. 3, pp. 3106-3109, Jun. 2009.