

지중케이블 활선검출기를 위한 자장 센서 개발

김기준¹, 오용철^{2,a}, 이경섭², 정한석², 김탁용³, 최미희⁴, 송민영⁵, 신철기⁶, 김진사⁷

¹인천대학교 메카트로닉스공학전공

²(주)주암전기통신 연구소

³(주)캠프하우스 연구소

⁴서울과학기술대학교 NID 기술융합대학원

⁵광운대학교 전기공학과

⁶부천대학 디지털정보전자과

⁷조선이공대학 메카트로닉스과

Development of Magnetic Sensor for Live Line Detector of the Underground Cable

Ki Joon Kim¹, Yong-Cheul Oh^{2,a}, Kyeong Seob Lee², Han Seok Jung²,
Tag Yong Kim³, Mi Hui Choi⁴, Min Yeong Soung⁵, Cheolgi Shin⁶, and Jin-Sa Kim⁷

¹Department of Mechatronics Engineering major, University of Incheon, Incheon 406-772, Korea

²R&D Center, Juam Electric & Communication Co. Ltd., Seoul 139-848, Korea

³R&D Center, Camp House Co. Ltd., Eumseong 369-700, Korea

⁴School of NID Fusion Technology, Seoul National Univ. of Science & Tech., Seoul 139-743, Korea

⁵Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

⁶Department of Digital & Information Electronic Engineering, Bucheon University, Bucheon 420-735, Korea

⁷Department of Mecatronics, Chosun University College of Science & Technology, Gwangju 501-744, Korea

(Received December 12, 2010; Revised December 27, 2010; Accepted January 5, 2011)

Abstract: We use the electrical energy and it is essential energy in modern life, but we lay cable underground due to the issue for environment and safety. Safety for worker is still insufficient for the development of safety equipment and related research has been focused on the cable lifetime diagnosis at underground cable work. I have to develop live line detector around the magnetic field were investigated at underground cable. In this paper, we were investigated by variation of coil turns and load due to detection of magnetic field at lines around. And detected value of developing products compared with measured value of milli-gauss meter. As a result, the value of the number of coil turns was found to be proportional to the measured value. But turn-numbers increase showed that the weak noise. I could be confirmed that sensor showed the optimum value from 4,000 to 5,0000.

Keywords: Electrical energy, Underground cable, live line detector, Coil turns, turn-number

1. 서 론

현재 전기에너지는 인간의 삶에 매우 중요한 에너지이지만, 환경 및 안전의 문제로 발전 및 변전설비는 도심지에서 멀리 떨어진 장소에 설치하여 수용

a. Corresponding Author; ycoh00@naver.com

가에 고압으로 전기에너지를 공급하고 있다. 도심지에서는 건물의 고층화, 전자파의 피해 등으로 인해 가공선로를 지중선로로 변환하고 이로 인해 현재 대도시에는 약 20%에 가까운 배전선로가 지중화로 되어 있으며, 중소도시에 점차적으로 확산되고 있는 현실이다. 1980년대 중반부터 실시되어온 지중화 작업은 선로의 신설이 대부분이었으며, 시공 시 안전사고에 대한 문제점은 크게 대두되지 않았지만, 20년이 지난 현재 선로의 노후화, 지역의 변경으로 지중선로의 교체 및 사고가 발생하기 시작하고 있다 [1].

지중화의 증가는 지중화 작업 편리성을 위해 다양한 신제품과 설비가 출시되고 있지만, 대부분이 이에 대한 안전 확보가 중요하게 되었으며 전력공급과 수요의 대응량에 따른 안정성에 지중선로에 대한 장비는 선로의 열화를 검출하는 장비와 선로의 철거 및 시설 장비 위주로 개발 및 운용이 되고 있으며, 실제 선로 작업자를 위한 안전장구는 미흡한 상태이다. 특히 선로의 활선유무를 검출할 수 있는 활선경보기는 가공선로에서는 필수 장비로 규정하여 모든 배전선로 활선 전공자가 꼭 착용해야하는 장비중 하나이지만, 지중배전선로에서는 활선 유무를 검출할 수 있는 안전장구가 없다. 이로 인해 고압 지중선로 공사 중 작업자의 부주의로 인해 활선 선로를 교체선로로 오인하여 절단하는 사고가 발생하였으며, 이로 인해 작업자뿐만 아니라 수용자에게 많은 경제적 피해를 제공하게 되었다. 또한 기존에 개발된 활선경보기는 전계 검출형으로 고압에서만 적용이 가능하며, 지중배전선로와 같은 차폐기능이 있는 실드 케이블이나 복심구조를 가진 저전압용 전선에서는 검출이 불가능하다는 문제점이 있어, 현재 지중작업의 활선 판단은 전혀 하지 못하고 있다.

이에 본 논문에서는 자계를 이용하여 지중 배전선로의 활선 여부를 검출할 수 있는 장치 개발하기 위해 자계검출센서 및 센서 모듈을 개발을 위한 연구를 하였다. 개발 방향은 을 저가형이며 휴대가 가능한 구조를 목표로 자계센서를 탐색코일타입으로 적용하였으며 [2-4], 센서로부터 검출된 신호를 필터 및 증폭을 통해 선로 주변의 신호만을 검출할 수 있도록 제작하였다. 탐색코일 센서는 전자유도작용을 이용한 것으로 주변 교번 자계에 대한 유도기전력을 최적으로 구성하기 위해 턴 수의 변화를 주어 검출 감도를 조사하였다. 검출된 신호를 60 Hz 밴드패스필터와 LPF (low pass filter) 를 적용하여 선로에 흐르는 상

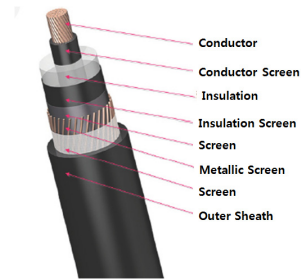


Fig. 1. Structure of underground cable.

용전원 주파수 성분만을 검출할 수 있는 시스템을 제작하여 실제 자계검출기 (Gauss Meter)와 개발 시스템과의 검출값을 비교하여 개발 시스템의 안정화를 검증하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 센서

자계 검출 소자는 여러 가지가 있으나 물성분야에서는 직류 강자계를 대상으로 홀 (hall) 소자를 적용한 자계측정기가 많이 이용되고 있으며, 특수용도로 미세한 생체에너지를 검출하기 위해 스쿼드 (SQUID) 라는 고감도센서를 적용하고 있다 [5,6].

지중 배전 케이블은 전계차폐를 위해 그림 1과 같은 구조로 연동선으로 된 중성선을 접지시키므로 외부로 방출되는 전계를 차단시키는 효과가 있다. 그러나 자계는 60 Hz의 극저주파로 차폐되지 않고 외부로 방출되며, 이러한 극저주파 자계의 측정을 위해 진폭범위와 주파수 범위 및 휴대성, 가격, 안정성 등이 우수한 코일형 자계 센서를 제작하였다 [7]. 또한 배전선로의 경우 수백 mA에서 수백 A의 전류가 흐르고 있으므로, 최소 수백 mA 이상을 검출할 수 있는 구조로 제작하였다.

실제 지중케이블에 220 mA의 전류가 흘렀을 때 선로에 표면에서는 4.9 mG의 자계가 검출되었다. 교류 유도 기전력의 크기 V 는 식 (1)과 같이 Faraday 법칙으로 구할 수 있다.

$$V = \omega N S B \quad (1)$$

여기서 ω : 각 주파수

N : 권선수

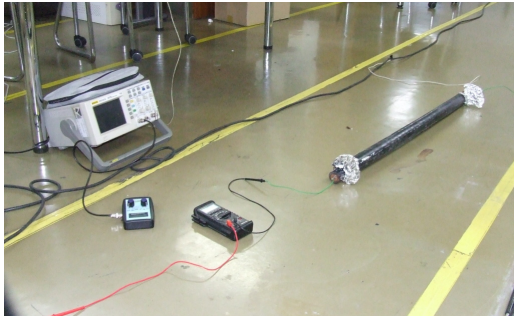


Fig. 2. Simulation environment.

S : 코어의 단면적

B : 코어를 관통하는 자속밀도

2.2 시뮬레이션 및 실험

센서 모듈 및 필터 회로를 구성하기 위해 Pspice와 Multisim을 이용하여 회로에 대한 시뮬레이션을 실시하였으며, 전류변화에 따른 개발 센서의 자속 특성을 조사하기 위하여 그림 2와 같이 선로의 일부분에 지중케이블을 삽입하고, 중성선을 묶어 접지시킨 후 부하를 변화시켰다. 이때 흐르는 전류 및 지중케이블 주변의 자속을 밀리가우스미터를 이용하여 측정하였으며, 개발 센서 및 센서모듈을 통해 전압을 측정하였다. 측정방법은 부하를 증가 또는 감소시켜 출력값을 측정하였으며, 센서모듈 전원은 3V DC 배터리로 독립적으로 공급하였다. 오실로스코프의 접지단자는 독립전원의 (-) 단자와 연결하여 계측기의 자체 접지에 의한 오동작을 최대한 제거하였다. 측정횟수는 각각 30회 이상을 측정하였으며, 부하로는 가정에서 주로 사용되는 실제 부하를 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 센서

표 1은 제작된 자계 센서의 재원을 나타낸 것으로 동일환경에서 코일 턴수를 3,000, 4,000, 5,000, 6,000 턴으로 변화시켰다. 코일은 $\Phi 0.06$ mm 동선을 이용하였으며, IMPEDANCE METER (DELICA)를 이용하여 120 Hz에서 턴수 변화에 따른 임피던스를 측정하였다.

Table 1. Characteristic of magnetic sensor.

Condition	Spec.
Core Type	Bar Core
Core material	ferrite
Relative Permeability (1M Hz)	750
Size	$\Phi 6$ mm
Turns	3,000
	4,000
	5,000
	6,000
Inductance (120 Hz)	213 mH (3,000turn)
	373 mH (4,000turn)
	585 mH (5,000turn)
	825 mH (6,000turn)

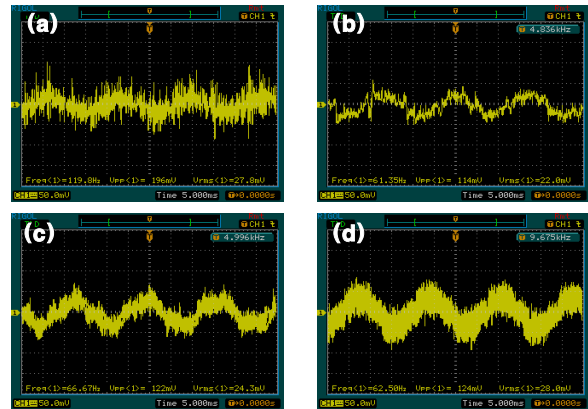


Fig. 3. Detector sensitivity due to variation of Coil turns. (a) 3,000turn, (b) 4,000turn, (c) 5,000turn, (d) 6,000turn.

그림 3은 턴수 변경 시 센서의 검출값을 나타낸 것으로 3,000턴은 노이즈로 인해 검출 주파수가 119 Hz로 선로 전류에 의한 신호를 잠식하는 형태를 나타내었으며, 측정값도 6,000턴의 경우와 비슷한 27 mV의 값을 나타내었다. 4,000턴 이상은 선로 노이즈로 인한 선로신호가 잠식되지 않는 것을 알 수 있었다. 센서 검출값은 4,000턴에서 22 mV, 5,000턴에서 24.3 mV, 6,000턴에서 28.0 mV의 값으로 턴수의 변화는 검출값이 상승으로 증가하였다. 그러나 턴수의 증가는 검출 감도 뿐만 아니라 노이즈 성분도 증가시키는 효과가 발생하여 6,000턴은 고주파 성분으로 과형이 일그러지는 현상이 나타나기 시작하였다. 지중 배전선로의 경우 수백 mA에서 수백 A의 전류가 흐르므로 이를 검출할 수 있는 최적의 탐색코일의 턴 수는 5,000턴

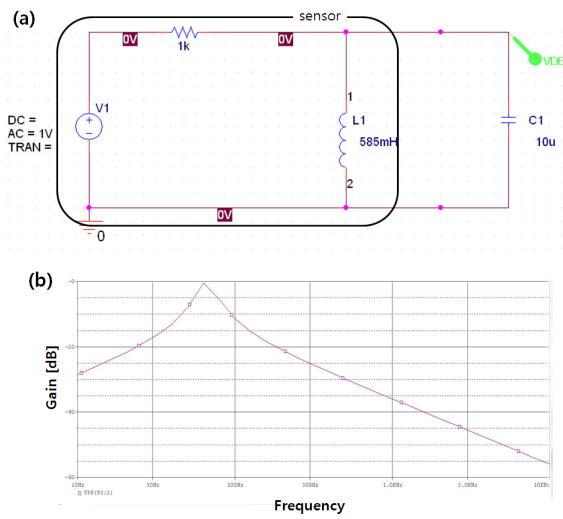


Fig. 4. Sensor filter. (a) Equivalent circuit, (b) Gain

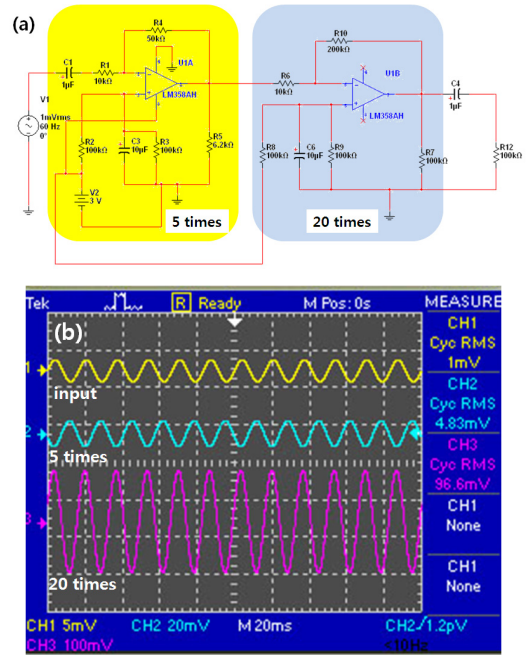


Fig. 6. Amplifier circuit. (a) Amplifier circuit, (b) Simulation Output.

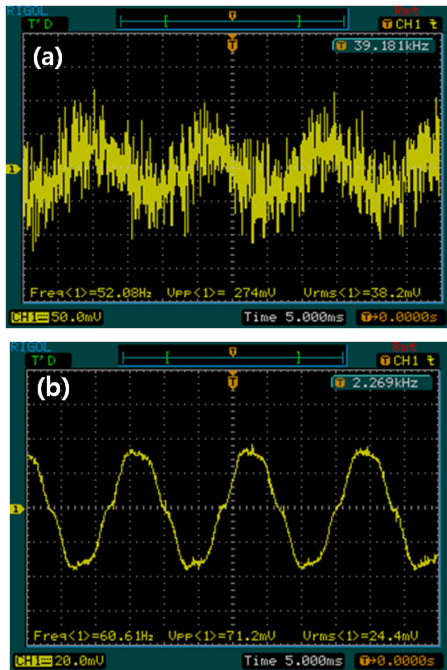


Fig. 5. Characteristic of sensor filter. (a) Normal, (b) Included the sensor filter.

으로 설정할 수 있었다.

3.2 센서 모듈

센서 모듈은 센서 필터, 증폭기, LPF (low pass filter) 등으로 구성되어 있다. 센서의 성분이 인덕턴

Table 2. Active filter simulation value.

frequency [Hz]	60	100	6k	60k
Filter output [V]	103u	35.9u	3.54u	118p
Amp. output [V]	104m	36.1m	2.29u	3.0n
Input Voltage : 1 mV				

스와 저항을 가지고 있는 소자로 주파수 특성을 가지고 있으며, 선로의 자장은 60 Hz 성분을 가지고 있으므로 이를 위해 센서 필터는 자체적으로 60 Hz 성분을 검출해야 한다. 센서는 자체에 인덕턴스와 저항 성분을 가지고 있으므로 LC 탱크회로를 통해 60 Hz에서 최대 이득을 가지도록 센서와 병렬로 커패시터를 연결하였다 [6]. 그림 4는 센서 필터의 주파수에 따른 이득을 Pspice로 시뮬레이션 하였으며, 시뮬레이션 결과 62 Hz에서 최대 이득을 나타내고 있다.

그림 5는 센서 필터에 의해 검출된 자장신호를 나타낸 것이다. 센서 필터는 그림 5(b)에서 보는 바와 같이 검출파형과 함께 존재하는 고주파 성분을 모두 제거하여 고주파성분에 의한 피크변화가 안정적으로 나타남을 확인할 수 있었다.

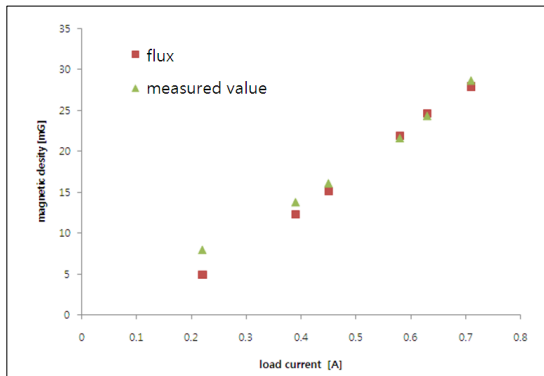


Fig. 7. Measurement value according to the variation of the load current.

Table 3. Magnetic field and measurement value according to the load variation.

Load Current [A]	0.22	0.39	0.45	0.58	0.63	0.71	Remark	
Gauss Meter [mG]	4.9	12.3	15.1	21.9	24.6	27.9	Increase	
Measure [mV]	Max	8.1	13.9	16.2	21.7	25.1		28.9
	Average	8	13.8	16.1	21.6	24.3		28.6
	Min	7.9	13.7	15.8	21.2	24		28.3
Gauss Meter [mG]	5	12.4	15	21.7	24.4	27.7	Decrease	
Measure [mV]	Max	7.9	14.1	16.0	21.5	26.6		31.4
	Average	7.7	13.7	15.9	21.3	26.5		31.0
	Min	7.6	13.6	15.7	21.2	25.3	29.7	

증폭기는 부귀한 반전증폭기를 적용하였으며, OP Amp의 전원을 DC전원으로 사용하므로 인해 측정신호의 반주기가 제거되는 것을 막기 위해 기준전위를 이동시켜 센서로부터 검출된 신호의 변형을 억제하는 구조로 설계하였다.

또한 220 mA에서 검출되는 자장은 4.9 mG로 센서의 측정시 80 uV의 값을 나타내므로 100배 이상의

증폭이 필요하였으며, 이를 위해 2단 증폭기를 적용하였으며, 1차 증폭에서 5배, 2차 증폭에서 20배로 조정하였다. 그림 6은 증폭기의 구조를 나타낸 것으로 시뮬레이션은 Multisim의 virtual 소자를 이용하여 실제 구현시 문제점이 없음을 확인하였다.

LPF는 센서 필터를 통해 들어오는 신호 일부와 회로 노이즈로부터 발생된 고주파 성분을 제거하기 위해 최종 증폭신호를 60 Hz 이상 차단 회로를 구성하였다. 차단회로의 선택도 (Q)는 1.3으로 설정하였으며, 다중궤환 LPF를 적용하였다.

표 2는 Multisim을 이용하여 실제 구현 시 주파수 특성을 시뮬레이션 한 것으로 100 Hz부터 출력값이 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 실제 구현 시 회로에 문제가 없음을 확인할 수 있었다.

3.3 자속변화에 따른 자속특성

그림 7은 부하전류에 따른 측정값을 나타낸 것으로 신호이득을 100배로 설정한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 220 mA에서는 가우스미터의 측정값이 3 mG가 더 크게 나타났으나, 450 mA 이상에서는 가우스미터 측정값이 개발 제품의 검출값과 유사한 값으로 나타남을 확인할 수 있었다. 실제 지중 배전선로의 경우 수백 mA이상의 전류가 흐르므로 본 개발제품의 적용은 큰 문제가 없을 것으로 생각된다.

표 3은 개발센서의 부하변화에 따른 데이터를 정리한 자료이다. 부하전류가 220 mA 일 때 오차율은 2.25%이었으며, 580 mA에서 4.52%의 오차로 가장 큰 오차율을 나타내고 있었다. 부하를 감소시키는 방향에서는 710 mA에서 5.48%로 가장 큰 오차율을 나타내고 있었다.

또한 부하를 높일 때와 낮출 때를 비교하면 부하를 높일 때는 220 mA에서 낮출 때에 비해 큰 값이 나왔으며, 부하를 낮출 때는 710 mA에서 높일 때보다 높은 출력값을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이는 초기 측정시 센서의 반응이 시작되어 높은 값을 표현하기 때문이라고 생각되며, 이를 위해 초기 값에 대한 신뢰성을 보완해야 할 것으로 생각된다.

4. 결론

지중케이블의 활선검출기 개발을 위한 주변 자장 검출 센서 개발을 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수

있었다.

- (1) 센서는 자체 인덕턴스로 인해 커패시턴스의 병렬 연결만으로 측정 신호 주파수 보정이 용이하였다.
- (2) 턴 수의 증가는 자속에 의한 유기기전력을 키우는 효과가 있었지만, 노이즈에 대한 응답성도 같이 향상되어 최적의 5,000턴의 탐색코일이 지중 케이블 자장 검출센서로 가장 적절한 것으로 확인될 수 있었다.
- (3) 실제 자속과 센서 유기기전력은 턴 수가 5,000턴 및 100배 증폭 시 실제 자속과 동일한 출력값이 나타남을 확인할 수 있었다.
- (4) 개발 제품의 오차율은 5%이내였으며, 제품의 안정화를 위해 일정시간이 소요됨을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 과제 (결과물)는 교육과학기술부·지식경제부

의 출연금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업의 연구결과입니다.

REFERENCES

- [1] Y. C. Oh, K. S. Lee, H. J. Lee, H. S. Jung, M. H. Choi, M. Y. Soung, K. J. Kim, *J. KIEEME* 157, (2010).
- [2] Li, D., Chun, K., Zuka, T., Fujita, H., *TECHNICAL DIGEST OF THE SENSOR SYMPOSIUM*, 16, 217 (1998).
- [3] Liakopoulos, T. M., Xu, M., Ahn, C., *SOLID STATE SENSOR AND ACTUATOR WORKSHOP*, 19 (1993).
- [4] N. K. Min, *Dongilbook*, 81 (2003).
- [5] KEPCO, *KEPCO* ,3 (2007).
- [6] KESRI, *KESRI*, (2003).
- [7] A. Ondrasova, S. Sevcik, L. Rosenberg, P. Kostecky, L. Turna, I. Kohut, *Measurement Science Review*, 5, Sec. 3 (2005).