

전력구 내 지중선을 이용한 2W급 상용주파수 무선전력 수신장치 개발

장기찬*, 최보환*, 김종원**, 임준택*
KAIST 원자력 및 양자공학과*, (주)테슬라나인**

ABSTRACT

본 논문은 전력구 내 지중선에서 발생하는 상용주파수 (60 Hz) 자기장을 이용한 2 W급 무선전력 수신장치를 제안한다. 제안하는 수신장치는 자성체와 구리도선을 포함하는 수신코일, 장치의 개폐를 위한 손잡이, 직렬공진회로 및 정류기를 포함하는 부가회로로 구성된다. 수신장치는 3상 지중선 중 하나에 설치되어 전력구 내 조명 및 온습도 센서를 구동하는데 사용 가능하다. 수신장치의 자성체로는 높은 기계적 강도 및 포화 자속밀도를 가지는 규소강판 박편이 사용되었으며, 직렬공진회로를 사용하여 최대전력을 수신하였다. 수신장치의 공진회로는 3 이하의 낮은 공진계수를 가지기에 50 Hz 및 60 Hz 지중선에 범용으로 사용이 가능하다. 사용된 규소강판 및 구리선의 무게와 가격의 곱을 성능지수(Figure of Merit)로 선정하여 이를 최소화하는 설계를 수행하였다. 제작된 시작품의 무게는 약 750 g중으로 2.2 W LED부하 구동이 가능하며, 이때 지중선의 전류는 100 A_{rms}로 가정하였다.



그림 1 지중선 전력구 터널 환경

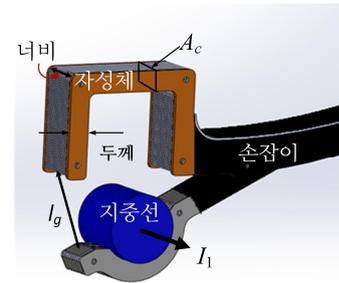


그림 2 제안하는 무선전력 수신장치의 개념도

1. 서론

최근 도심환경 미화 및 국민안전 개선을 위하여 기존 전신주 및 철탑에 설치된 전력선을 지중선으로 교체하는 작업이 활발하게 이루어지고 있다. 그림 1과 같이 지중선 설치를 위하여 지하 전력구를 사용할 경우, 전력구 내부의 유지보수를 위한 조명공급 및 온·습도 등의 주변환경 모니터링이 필수적이다. 이러한 조명 및 센서 구동을 위하여 유선 혹은 배터리를 이용한 전원공급이 일반적이었다. 하지만 장거리의 전력구 내부에 추가적인 유선 전원을 설치할 경우 시공비용이 급증하며, 배터리를 사용하면 배터리의 자연방전 및 용량의 문제로 인하여 최대 수년 주기로 교체 혹은 충전해 주어야만 한다.

비슷한 문제를 해결하기 위하여 선박 및 특수 목적용으로 전류가 흐르는 전선의 자기장을 이용한 에너지 하베스팅 기술이 제안되었으나, 일반적으로 수십~수백 mW급의 작은 전력을 생산하며, 상용제품으로 바로 사용하기에는 설치 및 거치가 용이하지 않다 [1] [3].

본 논문에서는 그림 2와 같이 집게 형태의 수신 장치를 제안하여 두꺼운 지중선에 설치가 용이하며 일반적으로 고압·고전류의 위험한 작업환경에서 작업자의 안전을 보장할 수 있다. 제안하는 수신장치는 그림 1의 3상 지중선 3가닥 중 하나의 전선을 감싸는 형태이며, 자성체 및 구리도선을 포함하는 수신코일, 장치의 개폐를 위한 손잡이, 그림 3의 직렬공진회로 및 정류기를 포함하는 부가회로로 구성된다. 높은 기계적 강도 및 포화 자속밀도를 가지는 규소강판 박편들을 각각 절연 후 접합하여 자성체를 구현하였으며, 수신코일의 임피던스를 직렬공진 커패시터로 보상하여 최대전력을 수신하였다[4]. 스프링으로 고정되는 집게를 사용한 손잡이는 장치의 설치 및 제거 시 작업자가 지중선에 접촉하지 않도록 도와준다. 낮은 동작주파수

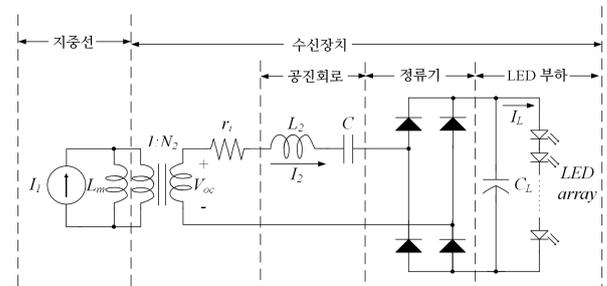


그림 3 부가 회로 및 수신코일을 포함하는 전체회로도

(50~60 Hz)를 가지는 무선전력 수신장치의 고질적인 부피 및 무게 문제를 완화하기 위하여 수신코일의 무게와 가격의 곱을 성능지수(Figure of Merit, FoM)로 나타내어 최적설계를 수행하였다. 100A_{rms}의 지중선 환경을 모사하여 2.2 W LED 부하를 구동하는 시작품을 제작하였으며, 제작된 시작품의 무게와 재료비는 각각 750 g중, 2,400원이다.

2. 제안하는 2W급 무선전력 수신장치

제안하는 수신장치의 설계에 사용되는 변수를 표 1과 같이 고정변수와 설계변수 그리고 종속변수 3가지로 분류하였다.

고정 변수 중 주파수는 상용주파수인 60 Hz, 지중선 전류는 100 A_{rms}로 주어진다. 자성체의 상대투자율 및 포화자속밀도는 재료에 따라 달라지나 본 논문에서는 투자율 2,000, 포화자속밀도 1.5 T의 특성을 가지는 규소강판을 사용하였다.

종속변수 중 자성체 내부의 자속밀도는 지중선으로부터 받

생하는 자속밀도와 수신코일 전류로부터 발생하는 자속밀도의 벡터합으로 주어지며 이는 규소강판의 포화자속밀도보다 낮아야 한다 [5]. 코일 내부저항은 구리 도선의 도선 저항 및 자성체의 철손을 포함한 값이다. 향후 성능지수를 사용하여 2 W의 출력전력을 목표로 수신코일의 권선 수, 자성체 단면적, 코일 반지름, 공극 등이 설계되었다.

표 1 제안하는 무선전력 수신장치 설계에 사용되는 변수들

고정변수		설계변수		종속변수	
f_s	주파수	N	권선 수	r_i	코일 내부저항
μ_r	상대투자율	A_c	자성체 단면적	I_2	코일 전류
I_1	지중선 전류	d_w	코일 직경	B_c	자성체 자속밀도
B_m	포화자속밀도	l_g	공극	P_o	출력 전력

* $f_s = 60 \text{ Hz}$, $\mu_r = 2,000$, $I_s = 100 \text{ A}_{\text{rms}}$, $B_m = 1.5 \text{ T}$

2.1 등가회로 해석

그림 4(a)는 제안하는 수신장치의 자성체 및 코일을 나타낸다. 자성체의 자속밀도 B_c 는 (1)과 같이 지중선 전류로부터의 자속밀도 B_1 과 수신코일 전류로부터의 자속밀도 B_2 의 벡터합으로 나타나며, 이때 B_1 과 B_2 는 각각 그림 4(b)의 등가 자기회로를 사용하여 (2), (3)와 같이 구해진다. B_1 은 일반적으로 B_2 보다 작으며 B_c 는 1.5 T 이하여야 한다. 그림 5는 직렬공진회로를 포함하는 수신코일 등가회로를 나타내며, 수신코일 인덕턴스와 공진하는 커패시터를 사용하여 수신코일 전류의 위상은 지중선 전류와 90도 위상차를 가진다.

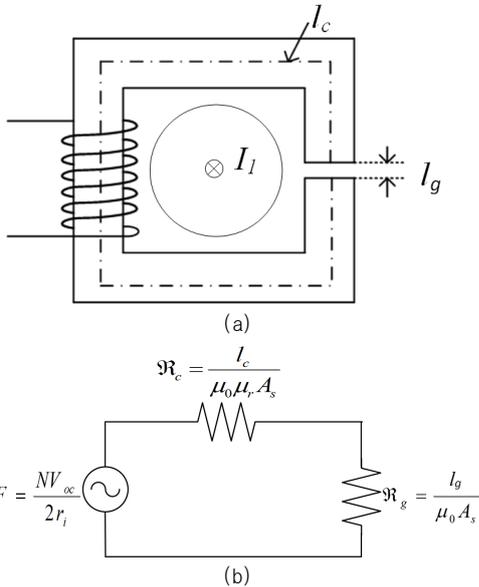


그림 4 수신 코일의 (a) 등가모델 및 (b) 등가 자기회로모델

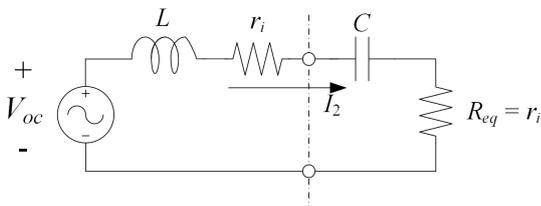


그림 5 직렬공진회로를 포함하는 수신코일 등가회로

$$|\vec{B}_c| = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} \quad (1)$$

$$|\vec{B}_1| = \frac{\Phi_1}{A_c} = \frac{\mu_0 \mu_r I_1}{l_c + \mu_r l_g} \quad (2)$$

$$|\vec{B}_2| = \frac{\Phi_2}{A_c} = \frac{\mu_0 \mu_r N V_{oc}}{2r_i (l_c + \mu_r l_g)} \quad (3)$$

그림5 및 (3)에서 사용된 수신코일의 유기전압 V_{oc} 는 페러데이의 법칙으로부터 (4)와 같이 B_1 을 사용하여 나타낼 수 있으며, (2),(4)에 의해 B_2 는 (5)와 같이 지중선 전류에 대한 수식으로 다시 정의할 수 있다.

$$|V_{oc}| = \omega N_2 |B_1| A_c \quad (4)$$

$$|\vec{B}_2| = \left(\frac{\mu_0 \mu_r N}{l_c + \mu_r l_g} \right)^2 \frac{\omega A_c I_1}{2r_i} \quad (5)$$

공진주파수에서 출력 전력은 (6)과 같이 표현되며 다이오드 정류기 및 LED 부하를 나타내는 등가저항 R_{eq} 는 수신코일 내부저항과 동일한 값으로 선택되어 공진주파수에서 최대전력 수신을 가능하게 한다.

$$P_o = \frac{|V_{oc}^2|}{4R_{eq}} \quad (6)$$

2.2 성능지수를 사용한 최적설계

수신코일의 무게와 가격의 곱을 성능지수(FoM)으로 나타내어 목표 출력 전력인 2 W를 만족하며 동시에 최저 가격 최소 무게를 가지는 수신 장치를 설계하였다. (11)은 성능지수를 나타내며, 이 때 사용된 변수는 (7)~(11) 및 표 2와 같이 정의된다.

$$W_s = A_s \times l_s \times \rho_s \quad (7)$$

$$E_s = W_s \times K_s \quad (8)$$

$$W_c = A_c \times l_c \times \rho_c \quad (9)$$

$$E_c = W_c \times K_c \quad (10)$$

$$\rightarrow \text{FoM} = (W_s + W_c) \times (E_s + E_c) \quad (11)$$

표 2 성능지수에 사용되는 변수

성능지수 요소					
W_c	구리 무게	W_s	규소강판 무게	W_t	총 무게
E_c	구리 가격	E_s	규소강판 가격	E_t	총 가격
ρ_c	구리 밀도		ρ_{cs}	규소강판 밀도	
K_c	구리 단위가격		K_s	규소강판 단위가격	

시작품 제작을 고려하여 아래 두 가지 제약사항이 최적설계 수행 시 고려되었다.

- 1) 시작품 공정오차를 고려하여 수신코일의 공극 l_g 는 최소 0.1mm 이상이어야 한다.
- 2) 설치환경을 고려하여 수신코일 자성체의 두께는 10mm 이하이어야 한다.

상기 제약사항을 고려한 FoM은 그림 6과 같이 나타낼 수 있

다. 자성체는 도합 두 개의 공극을 가지며, 공극이 작을수록 낮은 성능지수를 가지나 제약사항 1)을 고려하여 공극을 0.1mm 및 0.2mm로 고정된 후에 성능지수를 공극을 비교하였다. 그림 6과 같이 자성체의 두께가 5mm에서 12mm사이일 때 최저의 성능지수는 최저점을 가진다. 설계 결과에 따라 각 공극은 0.1mm로 자성체의 두께는 7mm로 선정되었다. 사용된 구리 및 규소강판의 단위가격 및 밀도는 표 3과 같다.

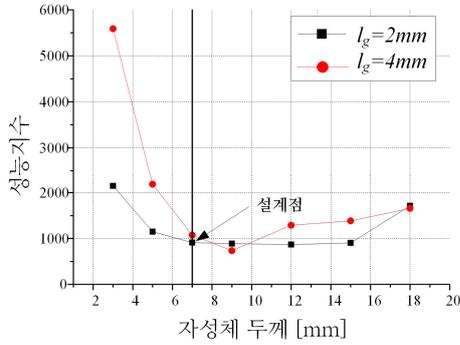


그림 6 최소공극 설정 후 자성체두께에 따른 총 무게

표 3 구리 및 규소강판의 단위가격(2015년 5월 기준) 및 밀도

	구리	규소강판 (0.3mm/sheet)
E (원/kg)	7,694	4,420
ρ (kg/m ³)	8,960	7,650

3. 실험 결과

그림 8(a)의 시작품 제작을 위하여 설계변수는 $N = 400$, $A_c = 154\text{mm}^2$, $d_w = 0.35\text{mm}$, $l_g = 0.2\text{mm}$ 로 선정되었으며 이것의 정면도는 그림 7에 나타나있다. 자성체의 와류손을 줄이기 위하여 80장의 0.3mm 규소강판을 절연 후 적층하여 자성체를 제작하였다. 30개의 LED를 부하로 사용하였으며, 수신코일 등 가저항인 13 Ω 을 고려하여 3직렬 10병렬로 연결하여 최대 전력을 수신하였다. 110 mH의 수신코일 인덕턴스와 60 Hz에서 공진하도록 극성이 반대로 연결된 전해 커패시터들을 사용하여 직렬 공진회로를 구성하였다. 낮은 순방향 전압을 가지는 쇼트키 다이오드를 사용하여 LED 부하와 연결된 전파정류기를 구성하였다.

그림 8(b)과 같이 100 A_{rms}의 지중선 환경을 모사하여 실험을 수행하였으며 LED 부하의 전압과 전류는 각 5.9 V, 375 mA로 2.2 W 출력전력을 확인하였다.

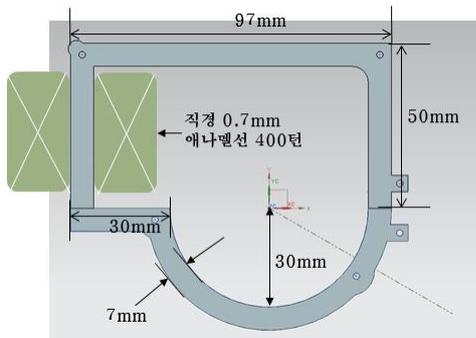


그림 7 60Hz 2W 무선전력 수신장치 시작품 정면도



(a)



(b)

그림 8 (a) 60Hz 2W 무선전력 수신장치 시작품 및 (b) 전력선에서 LED 경광등 구동 모습

4. 결론

본 논문은 지중선 또는 전력선에서 발생하는 상용주파수 자기장을 사용하는 2 W급 무선전력 수신장치를 제안하였다. 제안하는 집게 형태의 구조는 기존의 전력선 부착용 에너지 하베스팅 장치에 비하여 작업자의 안전 및 설치시간을 크게 개선할 수 있다. 다른 회로 소자에 비하여 비교적 고가인 규소강판 및 구리선의 가격 및 무게를 최소화 하는 최적설계를 수행하여 최종 시작품의 무게는 750 g중 이하, 재료비 단가는 2,400원 이하로 낮출 수 있었다. 본 논문에서 제안된 설계과정을 응용하면 향후 수십 mW의 사물인터넷부터 수 W 이상의 조명까지 다양한 산업분야에 적용이 가능할 것으로 기대된다.

이 논문은 2015년도 (주)테슬라나인의 연구비 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참고 문헌

- [1] Jinyeong Moon, Steven B. Leeb, "Enhancement on Energy Extraction from Magnetic Energy Harvesters," in *IEEE ECCE conf.*, 2015 pp. 427-434
- [2] Ville Särkimäki, Tero Ahonen, Risto Tiainen, Jero Ahola and Tuomo Lindh, "Analysis of the Requirements for an Inductively Coupled Power Supply for a Wireless Sensor," in *NORPIE*, 2006
- [4] J. Ahola et al., "Design Considerations for Current Transformer Based Energy Harvesting for Electronics Attached to Electric Motor," in *IEEE SPEEDAM. conf.*, pp. 901-905, Jun. 2008.
- [4] Rashed H. Bhuiyan, Roger A. Dougal, Mohammad Ali, "A Miniature Energy Harvesting Device for Wireless Sensors in Electric Power System," *IEEE Sensors Journal.*, vol. 10, no. 7, pp. 1249-1258, Jul. 2010.
- [5] Su Y. Choi, Jin Huh, Woo Y. Lee, and Chun T. Rim, "Asymmetric Coil Sets for Wireless Stationary EV Chargers With Large Lateral Tolerance by Dominant Field Analysis," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 12, pp. 6406-6421, Dec. 2014.