

준랜덤 자속을 사용하는 무선전력 전송 시스템

Wireless Power Transfer System Based on Semi-random Magnetic Flux

허준* · 전성준*

(Joon Heo · Seong-Jeub Jeon)

Abstract - In this paper, a wireless power transfer system with semi-random magnetic flux is studied. Directions of semi-random magnetic flux are changing almost randomly which can induce voltages at coils irrelevantly to coil's posture. So, very convenient charging is possible. Semi-random magnetic flux can be generated by a coil system which has three coils perpendicular to each other and carrying currents with different frequencies. A prototype for charging mobile devices is constructed and tested, and the proposal is verified.

Key Words : Wireless power transfer system, Semi-random magnetic flux, Resonance, Full compensation

1. 서론

전력전달을 위해 급전 측에서 집전 측으로 직접 전선을 연결하지 않아도 되는 장점을 지닌 무선전력전송시스템은 최근 들어 전기기기의 편리성과 안전성을 위하여 많이 연구되고 도입되고 있다[1]-[9]. 이런 장점으로 인해 휴대용 기기, 가전 기기, 사무용 기기나 전기 자동차 등에 무선으로 전기를 공급하는 시스템이 크게 주목을 받고 있다. 급전 측과 집전 측의 상호 거리가 자세가 고정되어 있지 않은 것은 장점이자 단점인데 급-집전 간의 거리가 멀면 자기인덕턴스는 크고 상호인덕턴스가 작은 문제점이 있고 자세가 바뀌면 상호 인덕턴스가 달라져 집전 성능이 변하는 문제점, 특히 자세에 따라 집전이 전혀 이루어지지 않는 경우도 생기는 문제점이 있다[10]-[12]. 급전 측과 집전 측의 이격 거리가 클 때에 발생하는 자기 인덕턴스는 크고 상호 인덕턴스가 작은 문제점은 사용 주파수를 높이고 공진을 도입하여 해결하고 있다. 집전 측 자세에 따른 전력전송이 잘 일어나지 않는 문제는 급전 측에 다수의 코일을 두거나 집전 측에 다수의 코일을 두어 해결할 수 있다[11]-[17]. 그 중 첫 번째로 집전 측에 다수의 코일을 사용하는 방법으로 세 개의 코일을 서로 직교하게 구성하고 각각의 기전력을 정류한 후 직류를 합성한다[11]. 두 번째 방법은 급-집전 양측에 다수의 코일을 두는 방법으로 급-집전 양측이 모두 3차원 구조를 가질 수 있을 때 유용하다[12]. 세 번째 방법은 급전 측에 다수의 코일을 두는 방법으로 3가지로 분류할 수 있다. 세 번째 방법에는 세부적으로 준랜덤 자속을 사용하는

방법[13], [14], 회전 자속을 사용하는 방법[15], [16]과 이동 자속을 사용하는 방법[17]이 있다. 준랜덤자속을 이용하는 방법에는 [14]에 소개된 변조된 전류를 이용하는 방법과 세 개의 다른 주파수의 정현파를 이용하는 방법[13]이 있다. 본 논문에서는 세 개의 다른 주파수의 정현파를 이용하여 발생시킨 준랜덤 자속을 사용하는 무선전력전송 시스템에 대하여 실용적 구현을 위한 연구를 하였고 프로토타입을 통하여 제안의 타당함을 보였다.

2. 본론

2.1 준랜덤 자속의 발생

어느 위치에서 발생하는 자속이 시간에 따라 방향이 랜덤하게 변하면 그 위치에 놓인 코일에는 코일의 자세 또는 방향에 관계 없이 기전력이 발생한다. 완전한 랜덤자속은 발생시킬 수 없다. 그러나 그와 유사한 자속은 발생시킬 수 있다. 먼저 다수의 코일에 동일한 전류를 흘리는 경우를 생각하면 공간에는 하나의 코일이 존재할 때와 자속 분포는 다르지만 어느 점에서든지 자속의 방향은 정해져 있고 크기만 변하는 교번 자속이 발생한다. 이런 경우 자속과 평행하게 놓인 코일에는 기전력이 발생하지 아니한다. 만일 다수의 코일에 동일한 주파수의 다상 교류를 가하면 회전 자속 또는 이동 자속 발생한다. 코일의 구성과 다상교류의 대칭성에 따라 다르지만 대칭성을 잘 유지하면 완전한 형태의 회전 자속(원형의 회전 자속) 또는 균등한 이동 자속이 발생할 수 있다[15]-[17]. 그러나 비교적 랜덤하게 변하는 것으로 볼 수 있는 자속은 급전부를 그림 1(a)와 같이 서로 직교하는 세 개의 코일로 구성하고 식 (1)과 같이 각기 다른 주파수의 전류를 흘려 발생시킬 수 있다. [14]에서는 변조된 전류를 흘리는 방법이 소개되어 있으나 공진 회로에 변조된 전류를 흘리기가 용이하지 못하다.

† Corresponding Author : Dept. of Electronic Engineering, Pukyong National University, Korea.
E-mail: jeub@pknu.ac.kr

* Dept. of Electronic Engineering, Pukyong National University, Korea.

Received : May 9, 2017; Accepted : July 27, 2017

$$i_a = I_m \cos \omega_a t \quad (1a)$$

$$i_b = I_m \cos \omega_b t \quad (1b)$$

$$i_c = I_m \cos \omega_c t \quad (1c)$$

$$\omega_a \neq \omega_b \neq \omega_c \neq \omega_a \quad (2)$$

설명 편의를 위해 급전 코일의 크기에 비해 충분히 먼 거리에 있는 P 점에 중심이 놓인 집전 코일을 고려하자. 집전 코일 중심의 자속은 다음과 같이 근사화할 수 있다[18].

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_p = & \frac{\mu_0 I_m r^2}{4R^3} ((\mathbf{a}_R 2 \cos \phi + \mathbf{a}_\theta \sin \phi) \cos \omega_a t \\ & + (\mathbf{a}_R 2 \cos \psi + \mathbf{a}_\psi \sin \psi) \cos \omega_b t \\ & + (\mathbf{a}_R 2 \cos \theta + \mathbf{a}_\theta \sin \theta) \cos \omega_c t) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 R 은 급전 코일의 중심 O에서 집전코일의 중심 P 점까지의 거리, ϕ, ψ, θ 는 각기 OP가 x -축, y -축, z -축과 이루는 각이다. \mathbf{a}_R 는 $\mathbf{a}_\phi, \mathbf{a}_\psi, \mathbf{a}_\theta$ 와 직교한다. 즉 $\mathbf{a}_\phi, \mathbf{a}_\psi, \mathbf{a}_\theta$ 는 \mathbf{a}_R 과 직교하는 평면상에 놓인다. 구면상에서 ϕ, ψ, θ 는 셋 다 동시에 90도가 될 수 없다. \mathbf{a}_R 방향으로는 세 주파수 성분 중 최소한 1개 이상이 존재한다. 또한 ϕ, ψ, θ 는 둘 이상이 동시에 0도가 될 수 없어 \mathbf{a}_R 과 수직인 성분이 둘 이상이 존재한다. $\mathbf{a}_\phi, \mathbf{a}_\psi, \mathbf{a}_\theta$ 중 동일 방향으로 두 개가 놓일 수 있다. 이때에는 나머지 하나가 이들과 수직이므로 언제나 독립 성분이 셋이 얻어진다. 따라서 어느 위치에서 어떤 자세로 있든지 집전코일에 수직으로 변하는 자속 성분이 하나 이상 반드시 존재하여 기전력이 발생한다. 그림 2에 코일의 크기에 비해 멀리 떨어진 위치에 발생된 준랜덤 자속의 방향과 크기를 도시하였다. 크기는 식 (3)에서 괄호 안의 부분만 고려하여 계산하였다. \mathbf{a}_R 방향은 지면과 직교하고 지면에는 \mathbf{a}_R 과 직교하는 성분 3가지가 표시되었다. 지면에는 \mathbf{a}_θ 방향의 성분이 수직으로 놓여져 있다. 주파수가 ω_a 인 \mathbf{a}_ϕ 방향의 성분은 검은색, 주파수가 ω_b 인 \mathbf{a}_ψ 방향의 성분은 파란색, 주파수가 ω_c 인 \mathbf{a}_θ 방향의 성분은 붉은색으로 표현되어 있다. 그림 2(a)~(d)에 (ϕ, ψ, θ)가 $(54.74^\circ, 54.74^\circ, 54.74^\circ), (71.0^\circ, 71.0^\circ, 27.4^\circ), (90^\circ, 90^\circ, 0^\circ), (45^\circ, 45^\circ, 90^\circ)$ 인 점에서 자속의 크기와 방향을 도시

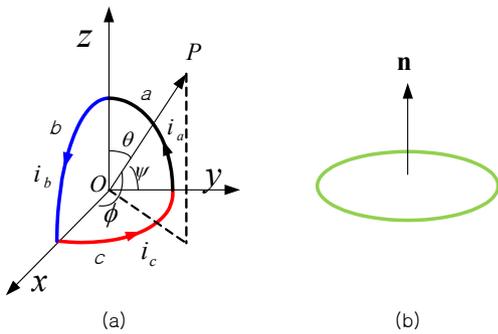


그림 1 준랜덤자속을 사용하는 급전 시스템의 코일
Fig. 1 Coils of wireless power transfer system using semi-random magnetic flux

하였다. 어떤 경우라도 \mathbf{a}_R 과 수직인 면에 2개 이상의 직교 성분이 존재하는 것을 알 수 있다. 집전코일에 유기되는 전압은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} v_{\text{pickup}} = & \frac{\mu_0 I_m r^2 S N}{4R^3} (-\omega_a (\mathbf{a}_R 2 \cos \phi + \mathbf{a}_\theta \sin \phi) \sin \omega_a t \\ & - \omega_b (\mathbf{a}_R 2 \cos \psi + \mathbf{a}_\psi \sin \psi) \sin \omega_b t \\ & - \omega_c (\mathbf{a}_R 2 \cos \theta + \mathbf{a}_\theta \sin \theta) \sin \omega_c t) \cdot \mathbf{n} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 S 는 집전코일의 단면적, N 은 권수, \mathbf{n} 은 코일면과 법선 방향인 단위 벡터이다. 집전코일에 2가지 이상의 주파수 성분이 존재하면 유기기전력에는 맥놀이 현상이 발생한다. 맥놀이의 주파수가 충분히 커야 리플이 적은 좋은 직류 전압을 얻을 수 있다. 따라서 세 주파수는 너무 인접하지 않고 적당히 떨어져 있을 필요가 있다. 그림 3에는 ω_a 는 0.9 [MHz], ω_b 는 1 [MHz], ω_c 는 1.1 [MHz]로 유기되는 급전 코일로부터 멀리 떨어진 위치에서 z -축상에 놓인 코일에 유기되는 전압을 시간함수로 표현하였다. (a)는 코일 면의 법선 방향이 x -축과 평행하고, (b)는 y -축과 평행하고 (c)는 z -축과 일치한 경우의 유기전압이다. (d)는 코일 면의 법선 방향이 x -축과 45도, y -축과 45도를 이루는 경우로 ω_a 와 ω_b 의 주파수 성분 둘 다 유기되어 맥놀이가 일어나는 것을 보여주고 있다.

2.2 시스템의 구성

준랜덤 자속을 발생시키고 그것으로 무선전력전송하는 시스템을 그림 4와 같이 구성하였다. 전력변환기는 [19], [20]에 소개

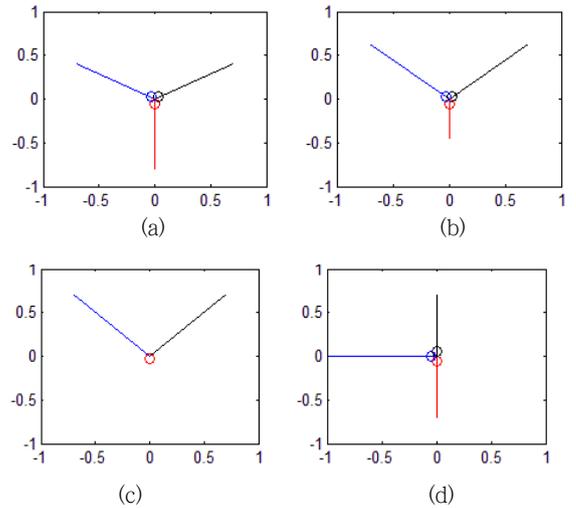


그림 2 준랜덤자속의 방향 및 크기 (흑색: ω_a 성분, 청색: ω_b 성분, 적색: ω_c 성분) (a) $(54.74^\circ, 54.74^\circ, 54.74^\circ)$, (b) $(71.0^\circ, 71.0^\circ, 27.4^\circ)$, (c) $(90^\circ, 90^\circ, 0^\circ)$, (d) $(45^\circ, 45^\circ, 90^\circ)$

Fig. 2 Direction and magnitude of semi-random magnetic flux (red: ω_a , blue: ω_b , black: ω_c)

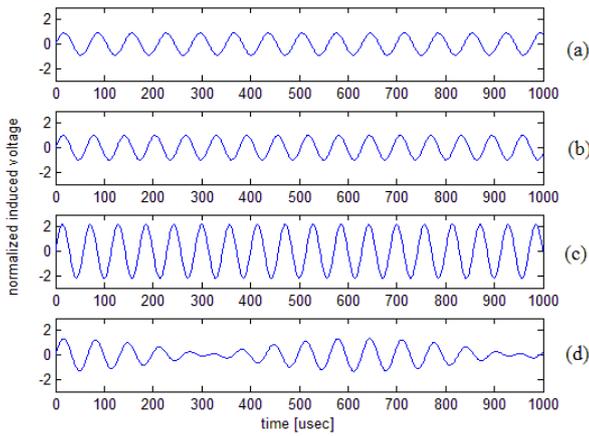


그림 3 집전 코일에서의 유기전압
Fig. 3 Induced voltages of pickup coil

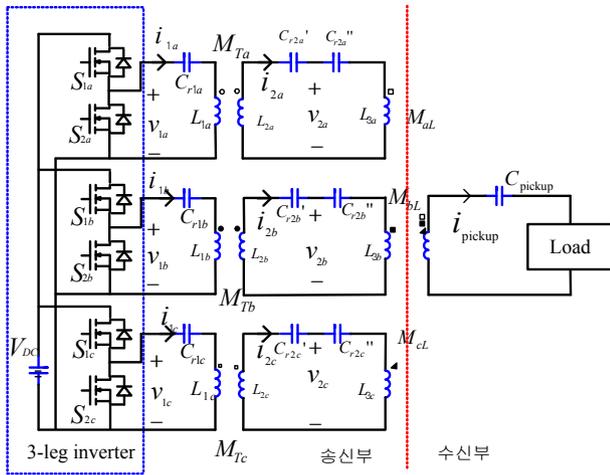


그림 4 준랜덤자속을 사용하는 급전 시스템의 회로
Fig. 4 Circuit of wireless power transfer system using semi-random magnetic flux

된 것과 같은 단상 반브릿지 인버터 3개로 구성하였다. 그림 4에 표시된 인버터의 세 출력의 (-) 측은 인버터 직류 입력의 (-) 측에 공통으로 연결된다. 각각은 독립적으로 별개의 주파수를 갖는 전압을 발생시킨다. 또한 PWM을 통하여 기본과 전압을 조절할 수 있다. 인버터 다음 단의 절연변압기는 안전을 위하여 직류 전원 측과 급전선 측을 분리 절연한다. 각각의 절연 변압기 1차 회로는 각각의 2차 회로와만 관계를 갖기 때문에 각기 별도로 설계한다. L_{3a} , L_{3b} 과 L_{3c} 로 표시된 코일은 그림 1에 나타난 급전 코일로 집전 코일과 더불어 하나의 변압기를 형성하지만 L_{3a} , L_{3b} 과 L_{3c} 은 서로 직교하고 있으므로 이들 서로는 상호 인덕턴스는 갖지 않는다. L_{3a} , L_{3b} 과 L_{3c} 는 집전코일과만 상호 인덕턴스를 갖고 그 값은 각기 M_{aL} , M_{bL} 과 M_{cL} 이다. 따라서 절연 변압기 2차 측과 급전 코일을 포함하는 회로는 다른 쪽과는 독립적으로 설계할 수 있다.

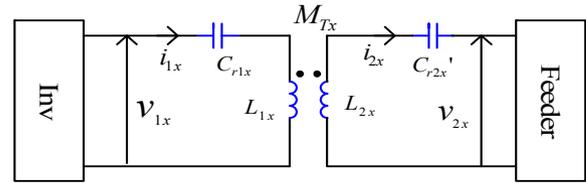


그림 5 절연 변압기의 모델
Fig. 5 Model of isolation transformer

2.3 절연변압기의 모델과 보상

절연변압기는 안전을 위하여 1차 측의 회로와 2차 측의 회로를 분리·절연하는 것이 목적이다. 제한한 회로에서는 이 목적 이외에 회로 동작에 중요한 역할을 하고 있다. 1차와 2차의 자기인덕턴스가 각각의 공진회로를 구성하는데 커패시터를 완전 보상하도록 선택하여 급전 전류의 제어가 용이하도록 하였다. 동작 주파수가 높아 공심형으로 제작하였다. 공심형의 단점은 발생자속이 공간 중에 흩어져 불필요한 곳에 자속이 지나가게 되어 잡음으로 작용할 수 있다. 따라서 자속이 가능한 절연 변압기 주변에 머물러 있게 할 필요가 있어 토로이달 형태로 제작 하였다.

본 연구에 사용된 절연변압기는 이상적인 변압기에 기초한 모델보다는 상호결합을 하고 있는 인덕터 모델로 표현하는 것이 사용하기가 쉽다[15],[20]. 그림 5는 사용된 절연 변압기를 결합된 2개의 코일을 갖는 인덕터 모델로 표현한 것으로 추가로 공진용(보상용) 커패시터가 회로에 직렬로 삽입된 것이다. x 는 그림 4에서 a, b, c에 상당한다. 이 모델에서 변압기는 정현파 동작을 가정하여 페이저로 표현하면 다음의 (5)와 (6) 식으로 표현된다.

$$V_{1x} = \frac{1}{j\omega_x C_{r1x}} I_{1x} + j\omega_x L_{1x} I_{1x} - j\omega M_{Tx} I_{2x} \quad (5)$$

$$V_{2x} = j\omega_x M_{Tx} I_{1x} - j\omega_x L_{2x} I_{2x} - \frac{1}{j\omega C_{r2x}} I_{2x} \quad (6)$$

L_{1x} , L_{2x} 는 각기 절연변압기의 1차와 2차의 자기 인덕턴스, M_{Tx} 는 상호 인덕턴스로 자기 인덕턴스는 전류의 흐름을 억제하기 때문에 전력 전달에 방해되는 항이다. 자기 인덕턴스에 생기는 전압 강하 항은 다음 식으로 주어지는 커패시터에 생기는 전압 강하로 상쇄시킬 수 있다.

$$\omega_x L_{2x} = \frac{1}{\omega_x C_{r2x}'} \quad (7)$$

$$\omega_x L_{1x} = \frac{1}{\omega_x C_{r1x}} \quad (8)$$

완전 보상 후 절연 변압기는 식 (9)와 (10)으로 표현되고 그림 6의 등가회로로 표현할 수 있다.

$$V_{1x} = -j\omega M_{Tx} I_{2x} \quad (9)$$

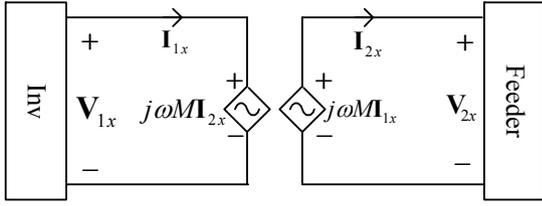


그림 6 완전 보상후의 절연 변압기의 등가회로
Fig. 6 Equivalent circuit after full compensation

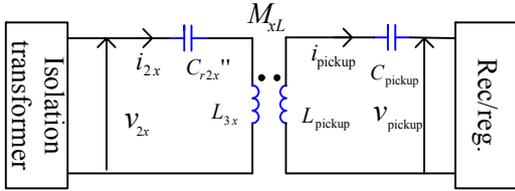


그림 7 급집전 코일의 모델
Fig. 7 Model of feeder and pickup coils

$$V_{2x} = j\omega_x M_{Tx} I_{1x} \quad (10)$$

2.4 급전코일-집전코일의 모델과 보상

세 코일 L_{3a} , L_{3b} 과 L_{3c} 는 서로 직교하여 서로에게 영향을 미치지 아니하므로 그림 7과 같이 절연변압기와 동일한 모델로 표현할 수 있다[15],[20]. 정현파 동작을 가정하여 페이저로 표현하면 전압-전류의 관계는 다음의 식으로 주어진다.

$$V_{2x} = j\omega_x M_{xL} I_{pickup} - j\omega_x L_{3x} I_{2x} - \frac{1}{j\omega C_{r2x}} I_{2x} \quad (11)$$

$$V_{pickup} = j\omega_x M_{xL} I_{2x} + j\omega_x L_{pickup} I_{pickup} + \frac{1}{j\omega C_{pickup}} I_{pickup} \quad (12)$$

자기인덕턴스와 관련된 항이 완전히 상쇄되어 전력을 잘 전달할 수 있는 완전 보상 조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\omega_x L_{3x} = \frac{1}{\omega_x C_{r2x}} \quad (13)$$

$$\omega_x L_{pickup} = \frac{1}{\omega_x C_{pickup}} \quad (14)$$

C_{r2x} 는 (8)으로 구한 C_{r2x} 와 직렬 합성하여 그림 2의 C_{r2x} 를 형성한다. 집전 코일에는 세 가지 주파수 성분이 존재하므로 세 주파수에서 (14)를 만족시키는 커패시터를 구할 수 없다. 본 논문에서는 세 주파수 중 중심 주파수에 일치시켰으며 다른 두 주파수에 대하여는 시스템의 이득이 약간 감소한다. 선택도가 큰 경우에는 참고 문헌 [21]에서 제시하는 회로로 세 주파수에서 완

전 보상하는 회로를 구성할 수 있다. 집전 코일의 전류에는 3가지 주파수 성분이 다 나타난다. 따라서 세 트랙의 급전 코일에는 3가지 주파수 성분의 전압이 다 나타난다. 그러나 인버터는 독립적으로 각각의 주파수로 동작하므로 각 트랙에는 해당 주파수의 전압과 전류에 의해 전력이 전달된다. 완전 보상 후의 전압 전류 관계식은 다음과 같이 주어진다.

$$V_{2x} = -j\omega_x M_{xL} I_{pickup} \quad (15)$$

$$V_{pickup} = j\omega_x M_{xL} I_{2x} \quad (16)$$

위 식을 (9), (10)과 연결하여 인버터와 집전 측의 관계를 다음과 같이 얻는다.

$$I_{1x} = -\frac{M_{xL}}{M_{Tx}} I_{pickup} \quad (17)$$

$$V_{pickup} = -\frac{M_{xL}}{M_{Tx}} V_{1x} \quad (18)$$

전류·전압의 관계가 이상적인 변압기와 유사하게 얻어졌다. 여기서 M_{xL} 은 집전 코일의 위치와 자세에 따라 주어지는 상호 인덕턴스이다. 집전 코일에는 세 가지 주파수 각각에 대하여 (18)로 주어진 전압이 중첩되어 나타난다. 위치와 자세에 따라 한 가지 또는 두, 세 가지의 주파수 성분이 동시에 나타날 수 있다. 두 가지 이상의 주파수 성분이 나타날 때에는 그림 3에서와 같이 맥놀이 현상이 발생한다.

2.5 부하용 정류회로 및 레귤레이터

pickup에 유기된 전압은 그림 8과 같이 전브릿지 회로로 정류한 후 buck converter로 구성된 레귤레이터를 통과하도록 하였다. 이 무선전력전송 시스템은 pickup이 어느 자세든지 항상 전압이 발생되도록 되어 있지만 위치나 자세에 따라 전압의 크기가 변한다. buck converter는 일정한 전압을 부하에 제공하는 역할을 한다.

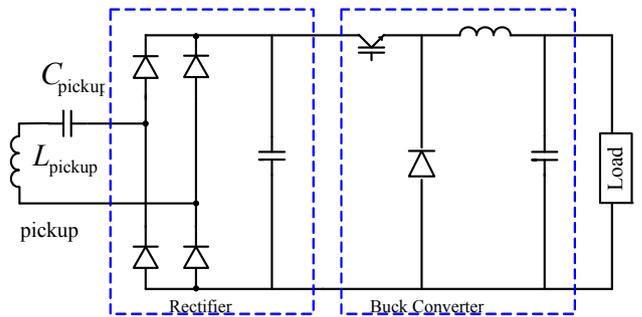


그림 8 정류 회로 및 레귤레이터
Fig. 8 Rectifier and regulator

3. 시험 및 고찰

3.1 프로토타입의 제작과 시험

제안한 준랜덤자속을 사용하는 무선전력전송 시스템의 프로토타입을 설계하고 제작하였다. 인버터에서 급전코일 앞단까지는 참고문헌 [21]과 매우 유사하게 구성하였다. 준랜덤자속을 발생시키기 위한 급전 코일 구동용 인버터의 스위칭 소자로 TI사의 GaN FET LMG 5200을 사용하였다. LMG 5200은 내부에 boot strap을 포함한 gate driver를 내장하고 있어 스위칭을 위한 디지털 논리 신호만 인가하여도 되므로 비교적 사용하기가 편리하다. 또한 body diode의 역회복 특성이 우수해 하드스위칭을 하여도 1 [MHz]로 문제없이 동작할 수 있다. 정격은 표 1에 나타낸 바와 같이 입력 전압은 32 [V], 급전 전류는 1.3 [A]다. 제작한 급전 코일과 집전 모듈은 그림 9와 같다. 집전 모듈은 집전 코일, buck converter와 부하가 일체로 만들어졌다. 급·집전부의 회로 정수는 표 1에 나타내었다. 급전부 세 코일에 흐르는 전류의 주파수는 준랜덤 자속을 발생시키기 위하여 각기 900 [kHz], 1 [MHz], 1.1 [MHz]로 설정하였다. 그림 10은 집전 코일 없이 급전 전류만 흘린 경우의 전류파형이다. 주파수가 다른 세 가지



그림 9 준랜덤 자속을 만드는 급전 코일 및 집전 모듈: (a) 급전 코일, (b) 집전모듈

Fig. 9 Feeder coils and pickup coil with : (a) feeder coils, (b) pickup coil with rectifier/regulator

표 1 프로토타입 공진형컨버터 및 급집전 코일 사양

Table 1 Specification of the prototype converter and feeder

명칭	기호	규격	
입력전압	V_{DC}	32 [V]	
급전코일	전류	I_{2x} 1.3 [A]	
	직경	66 [mm]	
	권수	24	
	자기 인덕턴스	L_{3a}	41.2 [μ H]
		L_{3b}	40.6 [μ H]
		L_{3c}	42.4 [μ H]
동작 주파수	f_a	0.9 [MHz]	
	f_b	1.0 [MHz]	
	f_c	1.1 [MHz]	
집전코일	내경	24 [mm]	
	외경	38 [mm]	
	권수	10	
	자기 인덕턴스	L_{pickup}	12.7 [μ H]

파형을 볼 수 있다.

제작한 집전부에는 정류용 다이오드로 MBR120VLSFT3 schottky 다이오드를 사용하였다. 일정한 전압을 얻기 위해 buck converter는 LM2575-3.3을 사용하여 3.3 [V]를 얻었다. 그림 11은 이후에서 집전 코일에 유기된 전압을 측정할 위치를 나타낸다. 급전 코일은 반지름 33 [mm]인 구면에 감겨져 있고, 측정 위치는 집전 코일의 중심이 반지름 53 [mm]인 구면상에 있다. 이 측정 위치는 그림 1에 표현된 집전 코일의 바깥쪽으로 (1)은 급전 코일 c의 법선 방향인 z-축 상이다. (2)는 x-z 평면에서 ϕ, θ 가 45도씩인 점이다. (3)은 ϕ, ψ, θ 가 54.74도씩인 점이다. (4)는 (2)와 대등한 점으로 볼 수 있어 측정에서 제외하였다. 구면은 이런 점들을 포함하는 구역과 대등한 것으로 볼 수 있는 구역이 16개로 구성되어 있다. 그림 12는 (1) 위치에 놓인 집전 코일에 유기된 전압으로 (a)는 코일 면의 법선이 z-축 방향과 일치하는 것으로 c 코일에 흐르는 전류와 동일한 주파수(f_c)의 전압이 유기된 것을 알 수 있다. (b), (c)와 (d)는 코일의 법선 방향이 다를 때 나타나는 전압을 보여준다. (d)의 경우는 코일 면의 법선이 $a_b + a_c$ 방향이어서 코일 a와 b에 흐르는 전류의 주파수인 f_a 와 f_b 성

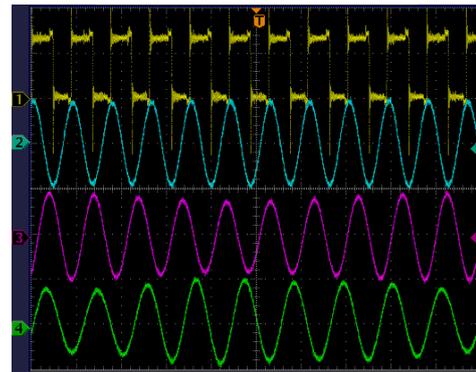


그림 10 인버터 출력전압 및 급전 전류 파형: 최상: v_{1c} (20 [V/div]), 그 외: i_{2c}, i_{2b}, i_{2a} (2[A/div]), 시간: 1[μ s/div]

Fig. 10 Inverter voltage and feeder Currents: top: v_{1c} (20 [V/div]), others: i_{2c}, i_{2b}, i_{2a} (2[A/div]), time base: 1 [μ s/div]

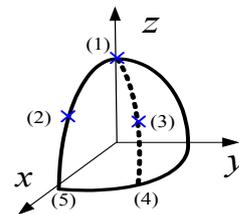


그림 11 유기전압 측정 위치: (1) z-축상, (2) x-z 평면 $\phi = \theta = 45^\circ$ (3) $\phi = \psi = \theta = 54.74^\circ$, (4) x-y 평면 $\phi = \psi = 45^\circ$

Fig. 11 Measurement points of Induced voltage: (1) x-axis, (2) x-z plane $\phi = \theta = 45^\circ$ (3) $\phi = \psi = \theta = 54.74^\circ$, (4) x-y plane $\phi = \psi = 45^\circ$

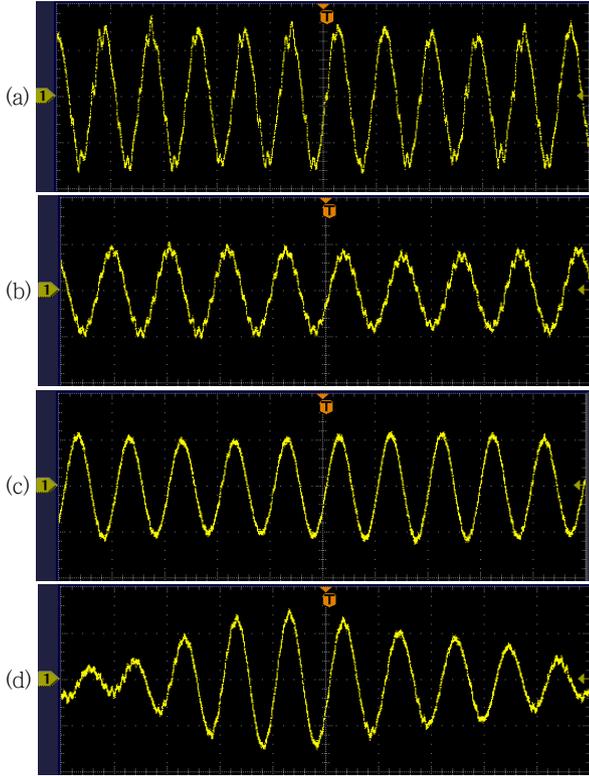


그림 12 (1) 위치에서 유기된 전압 (10 [V/div], 1 [μ s / div]):
 (a) a_R 방향, (b) a_ϕ 방향, (c) a_ϕ 방향, (d) $a_\phi + a_\phi$ 방향
 Fig. 12 Induced voltage at location (1) (10 [V/div], 1 [μ s/div]): (a) a_R , (b) a_ϕ , (c) a_ϕ , (d) $a_\phi + a_\phi$ direction

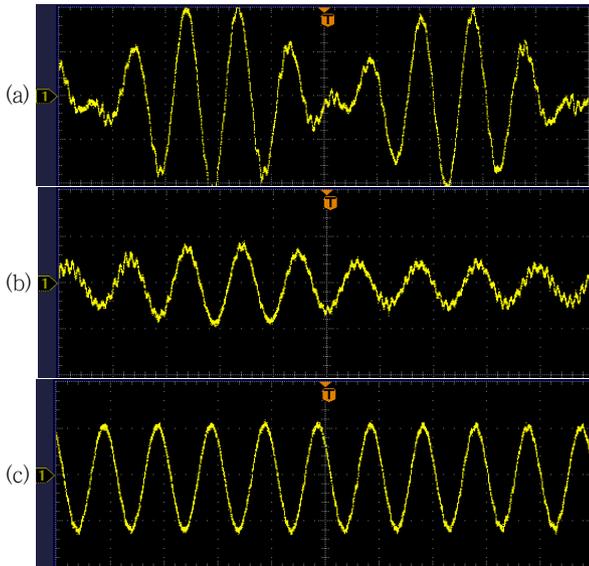


그림 13 (2) 위치에서 유기된 전압(10 [V/div], 1 [μ s/div]): (a) a_R 방향, (b) a_ϕ (a_θ) 방향, (c) a_ϕ 방향
 Fig. 13 Induced voltage at location (2)(10 [V/div], 1 [μ s/div]): (a) a_R , (b) a_ϕ (a_θ), (c) a_ϕ direction

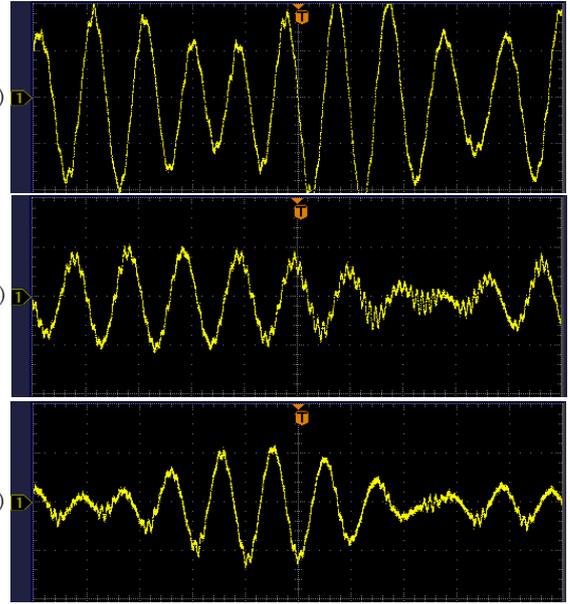


그림 14 (3) 위치에서 유기된 전압 (10 [V/div], 1 [μ s/div]): (a) a_R 방향, (b) a_θ 수직 방향, (3) a_θ 방향
 Fig. 14 Induced voltage at location (3) (10 [V/div], 1 [μ s/div]): (a) a_R , (b) perpendicular to a_θ , (3) a_θ direction



그림 15 급전 코일과 그 주변에 있는 다섯 개의 집전 모듈
 Fig. 15 Feeder coils and five pickup modules with rectifier/regulator

분 둘 다 나타나고, 이에 의해 맥놀이 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. 맥놀이 주파수는 두 주파수 간의 차주파수이다. 그림 13은 (2)의 위치에서 측정된 유기전압이다. 그림 14는 (3)의 위치에서 측정된 유기전압이다. 그림 15는 그림 9의 급전 코일에 외피를 20 [mm]를 입히고 집전부가 위치와 자세가 달라도 소정의 전압을 낼 수 있는 것을 보여주기 위하여 다섯 개의 집전 모듈을 다섯 곳에 놓아 전력전달을 받아 LED를 켤 수 있도록 하였다. 외피에 홈을 두어 집전 모듈을 삽입하거나 기대도록 하였다. 각 집전 모듈은 3.3 [V] 출력을 내고, LED를 포함하여 1 [W]의 부하가 연결되어 있다.

3.2 고찰

위의 실험을 통하여 제작한 준랜덤자속을 사용하는 무선전력 전송 장치는 유기 전압이 영이 되어 전력 전송이 불가능한 위치나 자세가 존재하지 않고 전압의 피크치가 가장 낮을 때 8 [V] 정도, 가장 높을 때 20 [V]를 약간 넘는 것으로 측정되어 그 비가 1:3 정도이다. 벡 컨버터나 부스트 컨버터를 정류회로 후단에 사용하면 1:5 정도의 입력전압 변동에도 일정한 출력전압을 얻을 수 있다. 출력이 크지 않은 시스템에서는 LDO(Low Drop Out) 선형 레귤레이터를 사용하여 출력을 안정화할 수 있다. 따라서 본 장치는 수신 측의 자세에 비교적 무관한 무선 충전 장치를 구성하는데 효과적이라고 할 수 있다. 본 방식의 단점은 급전 모듈이 하나인 경우는 구동부가 3개인 관계로 기존의 무선전력전송 시스템에서 급집전 코일이 정렬이 잘된 경우보다 효율이 낮을 수밖에 없다. 그러나 그림 15에서와 같이 다수의 집전 모듈이 사용되면 효율은 기존의 무선전력전송 시스템에서 급집전 코일이 정렬이 잘된 경우에 근접하게 된다. EMI와 관련해서는 에너지가 세 주파수로 분산되므로 하나의 주파수만을 사용하는 경우에 비해 완화될 수 있다 [22].

4. 결 론

본 논문에서는 준랜덤 자속을 이용한 무선전력전송 시스템에 대하여 논하였다. 급전 코일의 자세에 민감하지 않은 특성을 나타내어 휴대용 기기를 자유롭게 두고 충전하기에 매우 적합한 것을 확인하였다. 본 연구에서는 스위칭 소자로는 GaN FET를 사용하여 1 [MHz] 부근의 주파수로 동작시켰다. 필요에 따라 주파수 등 설계를 변경하여 제한한 컨버터를 활용할 수 있어 휴대용 기기에 많이 응용되기를 기대한다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의하여 연구되었음.

References

[1] H. Sakamoto and K. Harada, "A novel circuit for non-contact charging through electromagnetic coupling", IEEE PESC '92 record, pp. 168-174, 1992.
 [2] A. Esser, "Contactless charging communication for electric vehicle", IEEE Industry Application Society Annual Meeting, pp. 1024-1028, 1993.
 [3] K. Hatanaka, F. Sato., H. Hatsuki, S. Kikuchi, J. Murakami, M. Kawase and T. Satoh, "Power-transmission

of a desk with a cord-free power supply", IEEE trans. Magnetics, vol. 38, no. 5, pp. 3329-3331, 2002.
 [4] S.-J. Jeon, J. Heo, K. W. Lee and G. H. Cho, "Characteristics of the type core for contactless battery charger", KIPE Trans. vol. 8, no. 5, pp. 407-417, 2003
 [5] J. Boys, "Inductive Power Transfer Across an Extended Gap", WO 98/50993, 1998.
 [6] C.-S. Wang, O. H. Stielau and G. A. Covic, "Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger", IEEE trans. Ind. Elec. vol. 52, no. 5, pp. 1308-1314, 2005.
 [7] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P. Fisher and M. Soljacic, "Wireless Power Transfer via strongly coupled magnetic resonances", Science, vol. 317, no. 83, pp. 83-86, 2007.
 [8] A. Karalis, A.B. Kurs, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P.H. Fisher and M. Soljacic, "Wireless Energy Transfer", US 7825543 B2, 2010.
 [9] Seong-Jeub Jeon, Bo Yune Song, Jae Gue Shin, Dae-Won Seo, Sung Jun Son, and Dong-Ho Cho, "Pickup with compensating winding for KAIST OLEV", Proc. of 42nd KIEE Summer Conference, pp. 3-4, 2011.
 [10] J. Wang, S. L. Ho W.N. Fu and M. Sun, "Analytical design study a novel Witricity charger with lateral and angular misalignments for efficient wireless energy transmission", IEEE trans. Magnetics. vol. 47, no. 10, pp. 2616-2619, 2011.
 [11] D.-S. Lee, D.-N. Lim and S.-J. Jeon, "Wireless power transfer system insensitive to pickup's posture," KIEE Trans. vol. 63, no. 7, pp. 910-915, 2014.
 [12] O. Jonah, S.V. Georgakopoulos and M.M. Tentzeris, "Orientation insensitive power transfer by magnetic resonance for mobile device", 2013 IEEE Wireless power Transfer Conference, pp. 5-8, 2013.
 [13] D.-N. Lim, D.-S. Lee and S.-J. Jeon, "Output characteristics of pickup according to pickup's posture", Proc. of 8th Conference on National Defence Technology, pp. 824-828, 2012.
 [14] W.M. Ng, C. Zhang, D. Lin and S.Y.R. Hui, "Two- and three-dimensional wireless power transfer", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 29, no. 9, pp. 4470-4474, 2014.
 [15] D.-N. Lim, D.-S. Lee, S.-J. Jeon, and K. S. Lee, "Wireless power transfer system Suitable for wristwatch type equipment", Proc. of IEEE WPTC 2014, pp. 174-177, 2014.
 [16] B.-J. Che, G.-H. Yang, F.-Y. Meng, K. Zhang, J.-H. Fu, Q. Wu and L. Sun, "Omnidirectional non-radiative wireless power transfer with rotating magnetic field and efficiency improvement by metamaterial", Appl. Phys. A, vol. 116, pp.1579 -1586, 2014.

- [17] S.-J. Jeon, "2-phase drive for electric vehicle charging", Proc. of KIEE Summer Conference 2015, pp. 1-2, 2015.
- [18] D.C. Cheng, "Fundamentals of engineering electro-magnetics", Addison-Wesley, 1993.
- [19] R. L. Steigerwald, "A comparison of half-bridge resonant converter topologies", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 3, no. 2, pp. 174-182, 1988.
- [20] J. Heo and S.-J. Jeon, "Half-Bridge Resonant Converter with Coreless Isolation Transformer", KIEE Trans. vol. 66, no. 4, pp. 636-642, 2017.
- [21] S.-J. Jeon, "Resonant circuit for pickup of semi-random flux-based wireless power transfer system", Proc. of KIEE Summer Conference 2015, pp. 24-25, 2015.
- [22] J.T. Boys and P.G. Handley, "Spread spectrum switching: low noise modulation technique for PWM inverter drives", IEE Proc. B, vol. 139, no. 3, pp. 252-260, 1992

저 자 소 개



허 준 (Joon Heo)

1967년 3월 생. 2001년 8월 31일 부경대학교 전자공학과 졸업. 2005년 2월 25일 부경대학교 대학원 전자공학과 공학석사. 2011년 2월 25일 부경대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료. 2008년 6월~2014년 8월 (주)에테크놀로지 대표
 Tel: 010-6322-7345
 E-mail: hj10000@hanmail.net



전 성 줍 (Seong-Jeub Jeon)

1957년 생. 1980년 숭전대학교 전기공학과 졸업. 1982년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사. 2001년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사. 1982년 3월~1985년 2월 한국과학기술원 연구원. 1985년 3월~1986년 8월 한국전기연구소 연구원. 1986년 9월~현재 부경대학교 전자공학과 교수.
 Tel: 051-629-6216
 Fax: 051-629-6210
 E-mail: jeub@pknu.ac.kr