

논문 2013-50-7-34

주파수 제어에 의한 무선 충전 최적화 기법

(Optimizing Method for Wireless Charging with Frequency Control)

안 태 원*

(Tae-Won Ahn[©])

요 약

본 논문은 무선 충전 시스템의 최적화 기법에 대한 것으로서, 특히 캡슐형 내시경 응용을 위한 회로를 기반으로 한다. 이 논문에서는 저용량 배터리를 내장하는 무선 충전 시스템에서 전자기 유도 원리를 이용한 방식을 적용하여 배터리 용량을 필요 이상으로 증가시키지 않는 상태에서 여러 가지 상황에 대응하여 무선 전력 전송의 효율을 최적화하는 것을 목표로 하였다. 전자기 공진 코일의 무선 전력 전송의 효율을 증가시키기 위하여 전력 전송의 주요 결정 요소를 분석하고 주파수 제어에 의한 효율 최적화를 시도하였다. 모의실험 결과 제안된 최적화 기법은 무선 충전 효율을 안정화시키고 현재 문제가 되고 있는 거리 및 기생 성분에 의한 전송 효율 변이를 효과적으로 개선하는 것을 확인하였다.

Abstract

This paper presents an optimizing method for wireless charging system, specifically focused on the capsule endoscope applications. In order to increase the wireless power transfer efficiency of electro-magnetic resonance coupled coils, this paper investigates the impact factors of the power transfer efficiency in small battery capacity system and proposes an efficiency optimizing method based on frequency control. Simulation results show that the proposed efficiency optimal control method can effectively stabilize the wireless power transfer efficiency so as to successfully solve the main issue of transfer efficiency variation with distance and as well as parasitic element.

Keywords : 무선 충전, 캡슐형 내시경, 전자기 유도, 주파수 제어

I. 서 론

최근에 개발된 휴대용 IT 단말기의 경우 오랜 시간 동안 이동성을 유지하면서 사용할 수 있는 것이 필수적이다. 특히 멀티미디어의 고성능화 및 무선 데이터 사용의 증가 및 고속화는 휴대 기기의 전력 소비를 증가시키고 있으며 이를 해결하기 위하여 회로 자체의 저전력 기술 및 배터리 용량의 증가에 대한 계속적인 연구 개발이 이어지고 있다. 하지만 아직까지는 노트북 또는 스마트 폰을 많이 사용하는 경우에 여분의 배터리를 가지고 다니거나 유선 충전 어댑터를 가지고 다니는 경우가 많으며 진정한 무선 단말기의 완성을 위해서는 전원

공급 역시 무선으로 가능해야 할 것으로 기대하고 있는 상황이다.

무선 충전 방식에는 이미 몇 가지가 제안되어 왔다^[1~2]. 그 중 하나는 전자기 유도 원리를 이용한 비접촉식 (contactless) 충전 방식으로서, 이것은 변압기의 사이를 분리하여 한쪽 코일에서 다른 쪽 코일로 전자기 에너지를 전달하는 방식이다. 이 방식은 에너지 전달 거리가 수 밀리미터만 넘어가도 전력 전달 효율이 크게 떨어지기 때문에 전동 칫솔과 같은 일부 응용 분야에 제한적으로 적용되고 있다. 다른 기술로는 레이저 또는 마이크로파 기술을 이용한 전력 전송 방식으로서, 이것은 먼 거리에 높은 에너지를 전달할 수 있는 장점이 있지만 일반적인 휴대용 소형 단말기에 적용하기에는 위험 요소가 너무 많다. 그 외에도 초음파 기술을 이용하여 에너지를 전달할 수도 있지만 아직까지는 무선 충전에 적용되기는 어려운 상황이다.

* 정회원, 동양미래대학교 전기전자통신공학부
(School of Electrical Engineering, Dongyang Mirae University)

© Corresponding Author (E-mail: twahn@dongyang.ac.kr)
접수일자: 2013년3월7일, 수정완료일: 2013년6월20일

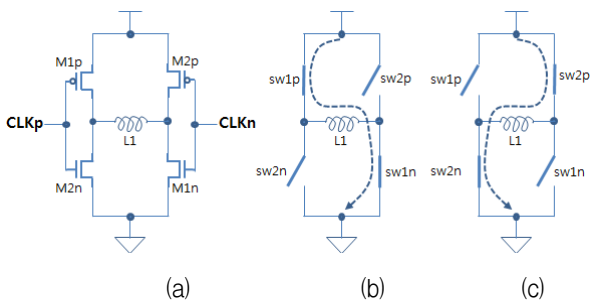


그림 2. 전력 송신부 회로 및 동작
Fig. 2. Power transmitter circuit and operation.

LOW 인 구간에서는 그림 2의 (c)와 같이 코일에 흐르는 전류의 방향이 반대로 결정되어 L1 에는 교류 전류의 흐름에 의한 자기장이 발생하게 된다.

그림 2와 같은 전력 송신부의 1차 코일에서 유도 기전력이 발생하면 캡슐형 내시경에 내장되는 전력 수신부의 2차 코일에 전자기 에너지가 전달된다. 전력 송신부와 전력 수신부의 거리, 코일의 방향성, 회로 구성 소자 값의 변이 및 기생 성분 등으로 인하여 전달되는 전력의 상태 변화에 대하여 전력 전송 손실을 최소화하는 것이 핵심이다. 특히 캡슐형 내시경의 경우에는 소형의 캡슐 내부에 내장되어야 하기 때문에 복잡한 회로 구현에 의한 고성능 보다는 단순하면서도 효과적인 방법이 요구되는 응용 분야이다.

본 논문에서 제안하는 전력 수신부 회로는 그림 3과 같이 코일 1개 (L2) 와 3가지의 승압 기능이 포함된 정류기 및 충전상태 감지회로로 구성된다. 전력 수신부에 입력되는 전력은 교류 신호이므로 먼저 직류로 변환해야 하는데 DC 전압 레벨이 배터리를 충전시키기에 부족한 경우 전압을 승압시켜야 할 필요성이 생긴다. 그림 3에서 원형 점선으로 표시된 부분 (C1, D1, C2, D2) 이 반파 정류기가 되면서 출력 전압을 2배로 증가시키는 회로 (Half-wave Voltage Doubler) 인데 본 논문에서는 이러한 모듈 3개를 직렬 연결하여 원래 DC 전압의 2배 (V2x), 4배 (V4x), 6배 (V6x) 가 생성되도록 설계하였다. 응용 분야 및 회로 조건에 따라 직렬 연결되는 모듈의 개수는 증감이 가능하다.

그림 3에서 사각형 점선으로 표시된 부분은 충전 전압 선택기로서 반파 정류된 2배 전압 (V2x), 4배 전압 (V4x), 6배 전압 (V6x) 중 한 개를 선택하여 배터리를 충전하도록 한다. 충전 전류를 감지할 수 있는 작은 저항 (Rsense)를 넣고, 이 양단의 전압을 비교기 U1 에 입력시켜서 충전 전류의 상태를 모니터링 한다. 또한

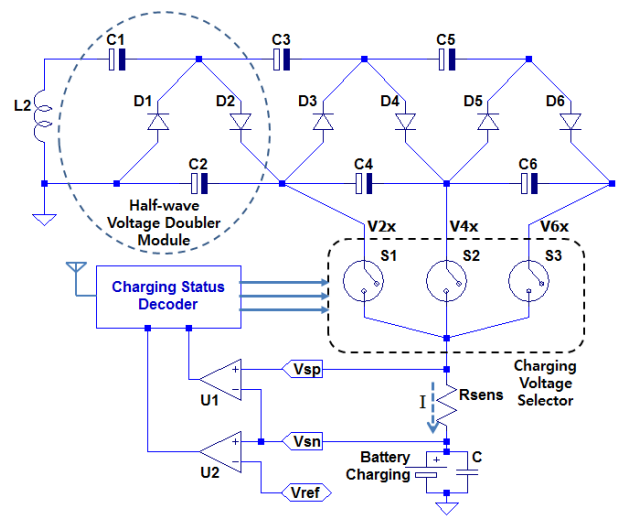


그림 3. 전력 수신부 회로
Fig. 3. Power receiver circuit.

배터리 전압 V_{sn} 은 비교기 U2 에 입력시켜서 배터리가 목표로 하는 전압 레벨에 도달했는지 모니터링 한다. 충전 전압 및 충전 전류의 레벨 상태 정보를 이용하여 충전 전압 선택기의 3개 스위치를 선택적으로 On/Off 시키도록 충전 상태 디코더의 로직을 설계한다. 또한, 충전 전압 및 충전 전류의 레벨 상태 정보는 ZigBee와 같은 저전력 통신 기술을 이용하여 수신부에서 송신부로 피드백되어 충전 전압 및 충전 전류를 최적화하는 방향으로 전력 송신부의 클럭 생성기 주파수를 제어하도록 설계한다.

III. 모의실험 및 결과

그림 2의 전력 송신부 회로 및 그림 3의 전력 수신부 회로의 동작 및 검증을 위해 Linear Technology 사의 LTspice 를 사용하여 모의실험을 수행하였으며, 두 코일 사이의 거리에 따른 상호 인덕턴스의 변화, 회로 구성 소자 값의 변화, 회로의 기생 요소의 변화에 대한 영향을 살펴보고, 주파수 제어에 대한 충전 상태 최적화 가능성 여부를 검증하였다.

1. 반파 정류회로 전압 배율기

그림 4는 전력 송신부에서 300 KHz 의 클럭 주파수가 생성되어 1차 코일 (L1) 에 전력 송신용 기전력이 발생하고, 이것이 100% 모두 (Coupling Coefficient $K = 1$ 인 경우) 수신부에 위치한 2차 코일 (L2) 에 전달된 경우의 반파 정류회로 전압 배율기의 출력 결과를 나타

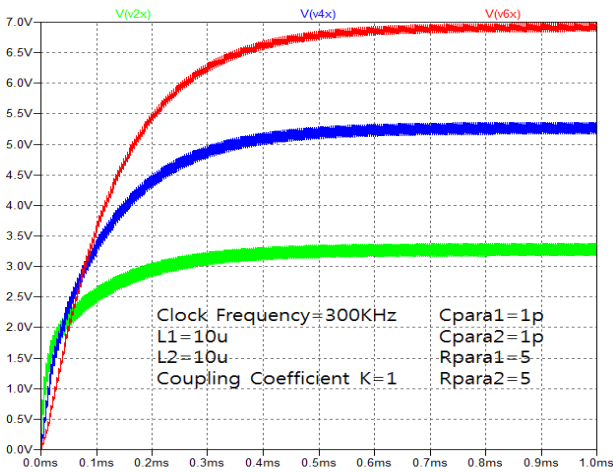


그림 4. 정류된 전압 배율기의 출력
Fig. 4. Rectified voltage multiplier output.

낸다. Cpara1, Rpara1 및 Cpara2, Rpara2 는 각각 송신부 및 수신부의 기생 (parasitic) 소자의 영향을 관찰하기 위한 모델링 변수이다.

반과 정류가 되면서 출력 전압을 2배로 증가시키는 회로 모듈 3개가 직렬 연결되어 원래 DC 전압의 2배 (V2x), 4배 (V4x), 6배 (V6x) 가 생성되는 것을 확인할 수 있다. 부하 저항이 감소하거나 직렬 연결되는 모듈의 개수가 증가하면 출력 전압에 손실이 나타나게 되는 것을 감안해야 하지만, 전력 수신단에 전송되는 에너지의 파워가 충전에 필요한 레벨에 부족한 경우 4배 또는 6배로 승압된 전압에 의해 충전이 효과적으로 진행되도록 설계할 수 있다는 것을 알 수 있다.

2. 코일 인덕턴스 변화에 따른 충전 전압 변이

그림 5는 전력 송신부에 위치한 1차 코일 (L1) 과 수신부에 위치한 2차 코일 (L2) 의 인덕턴스 변화에 따른 충전 상태의 변이에 대한 모의실험 결과이다. 300 KHz

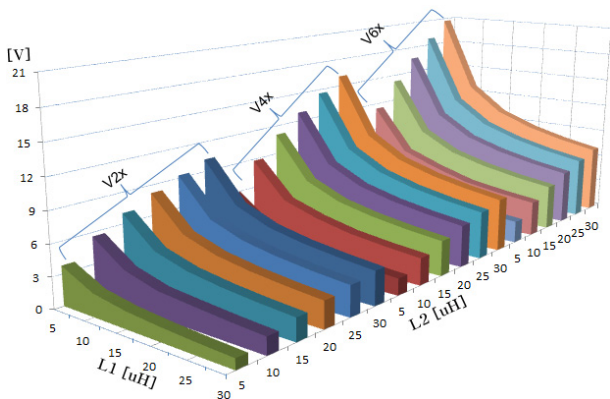


그림 5. 코일 인덕턴스 변화에 따른 충전 전압 변이
Fig. 5. Charging voltage variation vs. Coil inductance.

의 주파수에 대한 모의실험 결과, 1차 코일 (L1) 의 인덕턴스가 증가할수록 충전 전압이 감소하고, 2차 코일 (L2) 의 인덕턴스가 증가할수록 충전 전압이 증가하는 방향성을 확인할 수 있으며, 전력 송신부 또는 수신부 코일의 인덕턴스 변화에 따라 전송되는 에너지의 파워가 충전에 필요한 레벨에 부족한 경우 4배 또는 6배로 승압된 전압에 의해 충전이 효과적으로 진행되도록 설계할 수 있다는 것을 알 수 있다.

3. 상호 인덕턴스 변화에 따른 충전 전압 변이

그림 6은 1차 코일 (L1) 과 2차 코일 (L2) 사이의 상호 인덕턴스 변화에 따른 충전 전압 변이에 대한 모의실험 결과이다. Coupling Coefficient K 값이 감소할수록 충전 전압이 크게 감소하는 방향성을 확인할 수 있으며, 코일 사이의 거리 또는 각도 등으로 상호 인덕턴스 감소에 따라 전송되는 에너지의 파워가 충전에 필요한 레벨에 크게 부족한 경우 승압된 전압이 효과적으로 활용되도록 설계할 수 있다는 것을 알 수 있다.

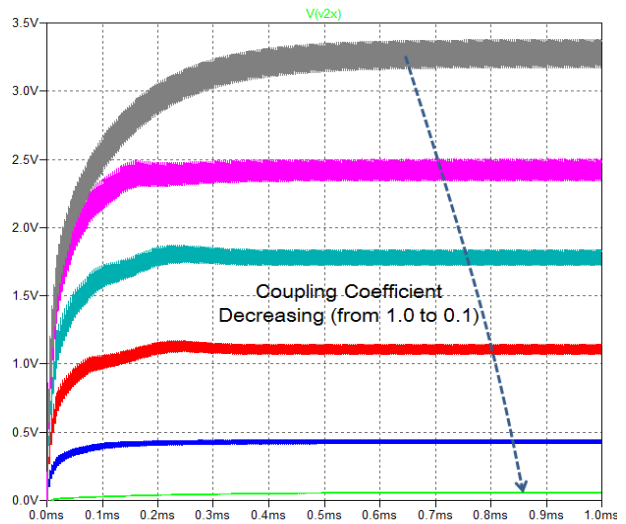


그림 6. 상호 인덕턴스 변화에 따른 충전 전압 변이
Fig. 6. Charging voltage variation vs. Mutual inductance..

4. 저항 성분 변화에 따른 충전 전압 변이

그림 7은 전력 송신부에 위치한 저항 성분 및 전력 수신부에 위치한 저항 성분 변화에 따른 충전 전압의 변이에 대한 모의실험 결과이다. Rpara1 및 Rpara2는 각각 송신부 및 수신부의 기생 저항 성분 변화에 따른 영향을 관찰하기 위한 것으로서 300 KHz의 주파수에 대한 모의실험 결과, 수신부의 기생 저항 성분이 증가

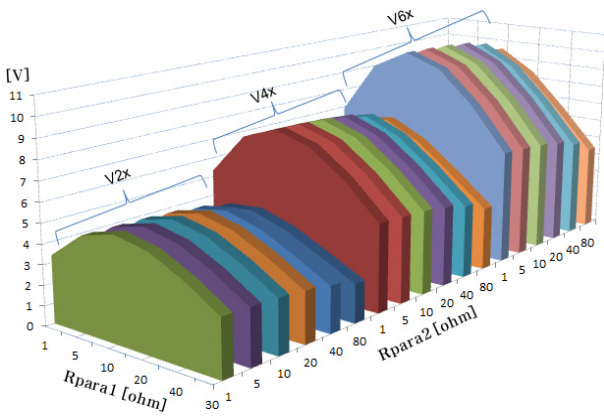


그림 7. 저항 성분에 의한 충전 전압 변이
Fig. 7. Charging voltage variation vs. Resistance.

할수록 충전 전압이 다소 감소하는 방향성을 보이지만 그 변화폭이 비교적 작은 편이고, 송신부의 기생 저항 성분에 따른 변화에서는 설계 최적 포인트의 결정이 가능하다는 것을 알 수 있다. 또한 전력 송신부 또는 수신부 코일의 저항 성분 변화에 따라 전송되는 에너지의 파워가 충전에 필요한 레벨에 부족한 경우 4배 또는 6 배로 증압된 전압에 의해 충전이 효과적으로 진행되도록 설계할 수 있다는 것을 알 수 있다.

5. 캐패시턴스 변화에 따른 충전 전압 변이

그림 8은 캐패시턴스 변화에 따른 충전 전압의 변이에 대한 모의실험 결과이다. 송신부 및 수신부의 기생 캐패시턴스 변화에 따른 영향 보다는 반파 정류회로 전압 배율기에 사용된 캐패시터 값 (C_x)의 변화에 대한 변화를 확인할 수 있었다. 300 KHz의 주파수에 대한 모의실험 결과, 전압 배율기의 캐패시턴스가 증가할수

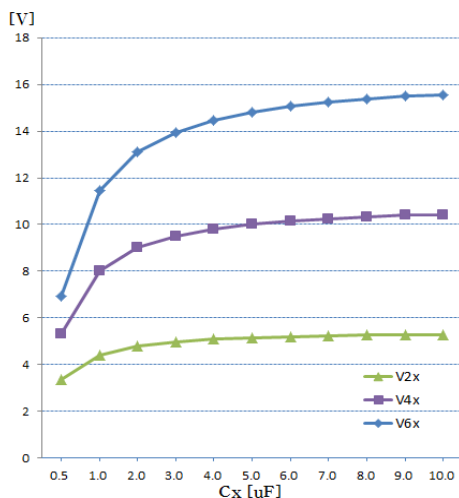


그림 8. 캐패시턴스 변화에 따른 충전 전압 변이
Fig. 8. Charging voltage variation vs. Capacitance.

록 충전 전압이 증가하는 방향성을 확인할 수 있으며, 그 변화폭은 어느 정도 이상 증가하면서 포화되는 경향을 나타낸다. 이 경우에도 캐패시턴스 변화에 따라 전송되는 에너지의 파워가 충전에 필요한 레벨에 부족한 경우 4배 또는 6배로 증압된 전압에 의해 충전이 효과적으로 진행되도록 설계할 수 있다는 것을 알 수 있다.

6. 클럭 주파수에 따른 충전 상태 최적화

그림 9는 전력 송신부에서 생성되는 클럭 주파수에 따른 충전 전압의 최적화에 대한 모의실험 결과이다. 앞에서 제시한 표 1에 기반한 클럭 생성기의 패턴에 따른 주파수 변화에 대한 모의실험 결과, 2배 ($V2x$), 4배 ($V4x$), 6배 ($V6x$) 증압된 전압 모두 300 KHz의 주파수 근방에서 설계 최적 포인트의 결정이 가능하다는 것을 알 수 있다.

특히 4배 또는 6배로 증압된 경우에 클럭 주파수에 따른 충전 전압의 최적화 효과가 분명히 나타나는 것을 알 수 있으며 앞 절에서 모의실험을 통해 알아본 바와 같이, 코일 인덕턴스 변화, 상호 인덕턴스 변화, 기생 저항 성분 변화, 기생 캐패시턴스 성분 변화에 따라 전송되는 에너지의 파워가 충전에 필요한 레벨에 부족한 경우에도 충전이 최적화되는 방향으로 진행되도록 설계할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

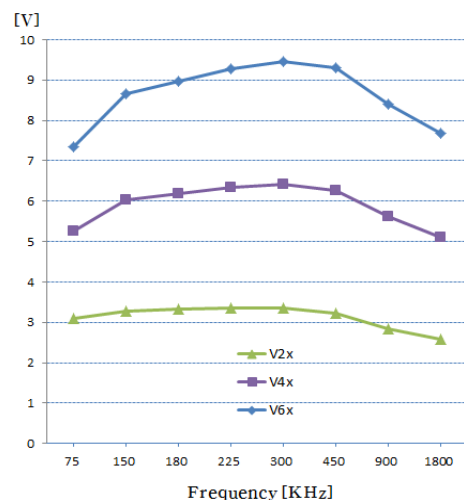


그림 9. 클럭 주파수에 따른 충전 상태 최적화
Fig. 9. Charging status optimization with Clock frequency.

IV. 결 론

본 논문에서는 전자기 유도 원리를 이용한 방식을 기

반으로 배터리 용량을 필요 이상으로 증가시키지 않는 상태에서 여러 가지 상황에 대응하여 무선 전력 전송의 효율을 최적화하는 기법을 제안하였다. 캡슐형 내시경에 적용 가능한 무선 충전 회로를 바탕으로 무선 충전 주파수를 자동 제어하는 방식에 의하여 무선 충전 효율이 개선되는 것을 확인하기 위하여 Linear Technology 사의 LTspice 를 사용한 모의실험을 수행하였으며, 두 코일 사이의 거리에 따른 상호 인덕턴스의 변화, 회로 구성 소자 값의 변화, 회로의 기생 요소에 대한 영향을 살펴보고, 주파수 제어에 대한 충전 상태 최적화 가능성 여부를 검증하였다. 본 논문에서 제시된 기법은 상황 변화에 따라 전송되는 전력의 파워가 충전에 필요한 레벨에 부족한 경우에도 승압된 전압 및 주파수 제어에 의해 최적화되는 방향으로 충전이 진행되도록 설계하는 것에 적용 가능하다.

REFERENCES

- [1] Zou Y W, Huang X L, Tan L L, "Current research situation and developing tendency about wireless power transmission," Proceedings of ICECE2010, pp. 3507 - 3511, Wuhan, China, 2010
- [2] Mandal T K, "Wireless transmission of electricity development and possibility," Sixth International Symposium Nikola Tesla, Belgrade, pp. 18-20, October, 2006
- [3] Soljagic M, Kurs A, Karalis A, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," Sci Express, pp. 83-86, 2007
- [4] 장연수, 김현철, 김수환, 진국진, "정전 용량형 SP4T RF MEMS 스위치 구동용 4채널 승압 DC-DC 컨버터," 전자공학회논문지, 제46권 SD편 제2호, 93-100쪽, 2009년 2월
- [5] 이상균, 문승언, 양일석, 김종대, "압전 에너지 하베스터 및 이를 이용한 배터리 충전," 대한전자공학회 2010년 하계종합학술대회, 1814-1815쪽, 2010년 6월
- [6] 정원재, 박준석, "RF 무선전력전송을 이용한 센서노드 배터리 충전용 전력획득모듈 연구 및 구현," 전자공학회논문지, 제48권 SC편 제6호, 34-42쪽, 2011년 11월
- [7] 정보통신부, 전자파 생체영향 및 표준화 연구, 한국전자통신연구원 편, 2001.

저 자 소 개



안 태 원(정회원)

1992년 서울대학교 전자공학과
학사 졸업.

1994년 서울대학교 전자공학과
석사 졸업.

2009년 숭실대학교 전자공학과
박사 졸업.

1994년~2002년 삼성전자 반도체 책임연구원.

2002년~현재 동양미래대학교 전자과 부교수.

<주관심분야 : 반도체 회로 및 시스템 설계>