

# 다출력 무선전력전송 시스템의 단일 PWM 독립 제어

다니엘 이삭, 김경탁, 박종후  
 송실대학교

## Independent Regulation of Multiple Output Wireless Power Transfer System Using a Single Pulse Width Modulation Signal

Daniel Thenathayalan Issac, Kyoung-tak Kim, Joung-hu Park  
 Soongsil University

### ABSTRACT

본 논문은 서로 독립적인 무선 전력전송 시스템의 출력들을 단일 PWM을 기반으로 하여 하나의 제어신호로 조절하는 공진형 컨버터의 설계와 구현을 다룬다. 각 출력마다 특정 주파수 범위를 할당하고 할당된 주파수를 가지는 정현파 전압 성분이 각 출력을 조절하는 제어신호로서 생성된다. 생성된 제어신호는 하나의 신호로 중첩되어 인버터 회로의 PWM 신호를 생성한다. 이 신호는 공진형 컨버터의 2차측의 대역통과공진 필터를 통과하면서 분리되어 진폭과 주파수 변조를 통해 출력을 조절한다. 본 논문에서는 4개의 출력을 가진 공진형 컨버터를 가정하였고 하드웨어 프로토타입 제작을 통해 제안하는 내용을 검증하였다.

### 1. 서론

최근 전자기술과 통신의 비약적인 발전으로 다양한 전력전자 어플리케이션들이 생활 전자기기에 사용되고 있다. 이에 따라 용도나 사용처에 따라 서로 다른 사양의 전원 및 배터리 충전기가 요구되고 있고 무선충전방식이 산업계와 일반 소비자의 큰 관심과 주목을 받고 있는 지금, 다수의 출력단과 무선 방식의 dc-dc 컨버터의 활용성이 극대화되고 있다.

일반적으로 다 출력 시스템의 경우 AC 전압원을 통해 각 출력과 연결된 트랜스포머의 입출력 비율로 출력들을 조절한다. 이러한 시스템에서는 Cross-regulation<sup>[1]</sup> 방법이나 Post-regulation 방법을 이용하여 하나의 PWM으로 다출력을 제어하는데 이는 하나의 제어 변수만을 가지고 있어 추가로 부가회로의 도움을 받아야 하거나 넓은 범위의 전압 변동에 대응하기가 어렵다는 단점이 있다.

두개의 출력을 가지는 공진형 컨버터를 이용한 시스템도 제안된 바 있다. 하나의 출력은 시비율로 출력을 조절하고 다른 출력은 주파수로 출력을 조절하는 방식을 취했다. 이 시스템에서 출력의 개수가 소수로 제한되고 각 출력마다 트랜스포머가 연결되어야 하는 단점이 있어 다출력시스템에서는 부적합하다. 이외에도 다 출력 컨버터 시스템에 대해 많은 연구가 이뤄지고 있지만 여전히 부피 대 전력의 밀도가 낮고 높은 가격과 낮은 효율 등이 단점으로 꼽힌다.

본 논문에서는 이러한 단점들을 보완하기 위하여 중첩된 단일 PWM 독립 제어 기반으로 하나의 트랜스포머를 사용하는 다 출력 무선전력전송 시스템을 제안한다.

### 2. 본론

### 2.1 제안하는 컨버터의 구성

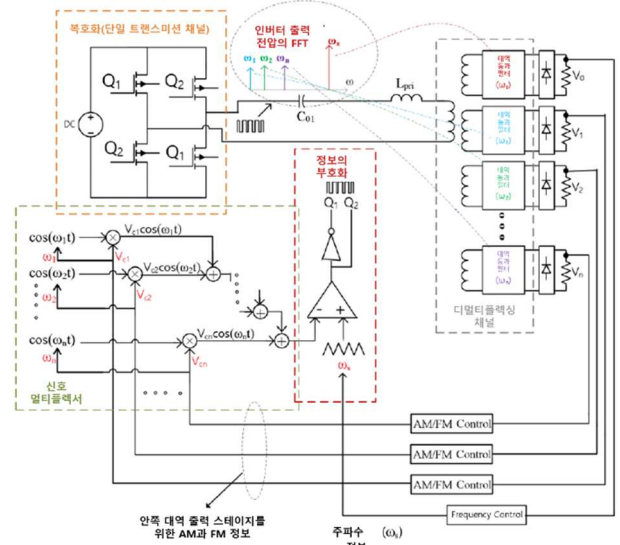


그림 1. 제안하는 시스템의 구성도 및 제어 체계

제안하는 다출력 공진형 컨버터는 그림 1과 같이 구성되어 있다. 트랜스포머를 기준으로 1차측에 단일 인버터가 위치해 있고 2차측에 대역통과필터가 각 출력에 연결되어 있다. 한 개의 출력은 반드시 인버터 PWM을 생성하기 위한 캐리어의 주파수를 이용하여 제어한다. 이외의 다른 출력들은 각 출력을 캐리어 신호와 비교하는 각각의 정현파 신호로 제어하는데, 진폭과 주파수 변조를 모두 이용하는 하이브리드 방식으로 제어한다. 캐리어 주파수로 제어하는 출력을 1번 출력이라고 한다면 1번 출력을 제외한 나머지 출력들의 제어 정현파 신호를 중첩하여 캐리어 신호와 비교하여 인버터의 PWM을 생성하는 구조이다.

### 2.2 하이브리드(진폭-주파수 변조) 제어

LC 직렬 공진 대역통과필터를 사용한 다출력 컨버터의 구조가 이미 제안된 바 있다. 각 출력의 제어에는 2.1에서 설명한 중첩된 정현파 PWM(SSPWM, Superposed Sinusoidal Pulse Width Modulation)제어를 사용하여 조절한다.<sup>[2]</sup> SSPWM 방식은 처음에 인덕션 히터<sup>[3]</sup>를 어플리케이션으로 하는 진폭 변조 방식의 단일 인버터 시스템에서 제안되었다. 인덕션 히터의 경우 부하가 유도성 부하이므로 각 출력 채널간 제한된 주파수 대역폭을 가지고 있기 때문에 넓은 범위의 저항성 부하의 경우에 적용하기가 어렵다. 이를 극복하기 위하여 저항성 부하를 위한 토폴로지가 소개되었지만 낮은

Q값을 가지게 설계되어 각 출력 채널간 주파수 대역을 멀리 떨어지게 위치시켜야 하기 때문에 전체 시스템 주파수 스펙트럼이 매우 넓어지게 되고, 경부하 시 채널간 간섭이 발생하여 출력전압 제어가 복잡해지는 단점을 가지는 구조이다. 제안하는 시스템은 무선전력전송용 트랜스포머를 사용하기 때문에 일반적인 트랜스포머보다 결합도가 낮고 이에 따라 전력전송효율이 낮다. 또한 낮은 결합계수의 트랜스포머는 높은 Q값을 가지는 공진 토폴로지를 요구하는데 이는 공진 구성요소들에 있어 큰 손실을 유발한다. 따라서 무선전력전송 시스템에서 낮은 Q 값을 가지게 설계해야 하지만 위에서 언급한 단점들로 인하여 설계가 어렵게 된다. 이를 극복하기 위해 진폭 변조만을 이용하여 제어하는 방식에서 스위칭 주파수 안쪽의 대역을 가진 출력들의 조절을 진폭과 주파수 변조를 모두 이용하는 하이브리드 방식으로 제어하는 기법이 제안되었다. 이를 이용하면 낮은 Q값의 공진시스템에서도 출력전압을 정확하게 조절할 수 있게 된다.

### 2.3 제안하는 시스템의 설계 고려점

#### 2.3.1 무선 트랜스포머<sup>[4]</sup>

일반적인 다출력 공진형 컨버터와 비교해볼 때 높은 결합계수를 가지는 트랜스포머와 달리 다출력 무선 전력 전송에 사용되는 트랜스포머는 각 출력마다 공극의 너비와 결합계수, 자화 인덕턴스의 값 등이 다르기 때문에 트랜스포머의 내부 파라미터간의 관계를 재 정립할 필요가 있다. 그림2는 예시로 사용된 다출력 무선 트랜스포머의 등가회로를 나타낸다.

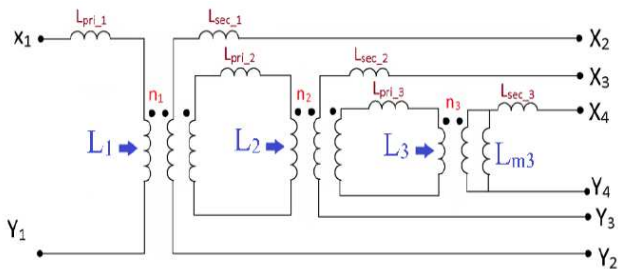


그림 2. 다출력 무선 트랜스포머의 등가회로

그림 2의 등가회로는 단일 트랜스포머로서, 3개의 출력을 가정했다. 입력 터미널인  $X_1$ 과  $Y_1$ 에 출력 터미널을  $X_2$ - $Y_2$ ,  $X_3$ - $Y_3$ ,  $X_4$ - $Y_4$ 라고 하면  $X_2$ - $Y_2$ 와 입력터미널의 결합계수가 가장 크고  $X_3$ - $Y_3$ ,  $X_4$ - $Y_4$ 의 순으로 결합계수가 작고 각 입출력간 턴수비는 모두 1:1임을 가정하면

- Transformer 1 ( $X_1, X_2$ ):  
Leakage =  $L_{pri1} (L_{sec1})$   
Magnetizing =  $L_{pri2} + L_{pri3} + L_{m3}$
  - Transformer 2 ( $X_1, X_3$ ):  
Leakage =  $L_{pri1} + L_{pri2} (L_{sec2})$   
Magnetizing =  $L_{pri3} + L_{m3}$
  - Transformer 3 ( $X_1, X_4$ ):  
Leakage =  $L_{pri1} + L_{pri2} + L_{pri3} (L_{sec3})$   
Magnetizing =  $L_{m3}$
- (1)

로 내부 파라미터를 정할 수 있다.

#### 2.3.2 공진 대역통과필터의 상호작용과 고조파 요소

제안하는 시스템은 넓은 동작 범위에도 대응할 수 있게 설계할 수 있다. 이를 고려하기 위해서 그림 3(출력 2개를 가정)과 같은 공진형 컨버터의 부하변동에 따른 이득곡선을 참조해 볼 수 있다.

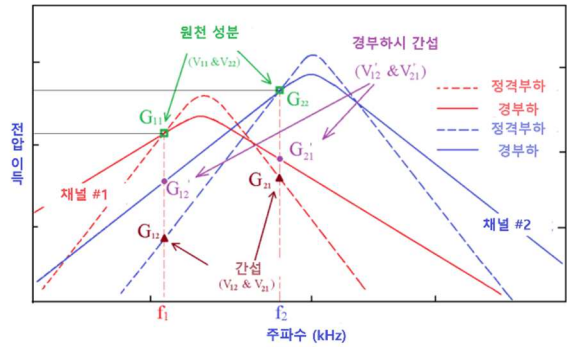


그림 3. 2 출력 공진형 컨버터의 이득 곡선

그림 3의 이득곡선을 보면 정격 부하에서 경부하로 옮겨갈 때 주파수는  $f_1$ 과  $f_2$ 로서 변하지 않고 원천 성분 역시 변하지 않음을 알 수 있다. 하지만 경부하 시(채널 1은 경부하, 채널 2는 정격 부하라고 가정)  $G_{21}$ 에 해당하는 이득이  $G_{21}'$ 로 증가하기 때문에 채널 1의 경부하 상태가 채널 2에 영향을 주는 간섭이 발생한다. 이 요소의 크기는 제어할 수 없는 요소이다. 따라서 이를 고려하여 설계하여야 한다.

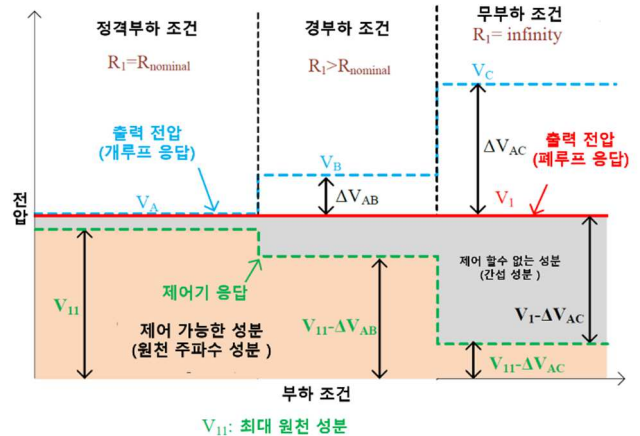


그림 4. 간섭을 고려한 개루프와 폐루프 응답 ( $V_{11} \geq \Delta V_{AC}$ )

$V_A$ 를 정격부하시 출력전압,  $V_B$ 를 경부하시 출력전압,  $V_C$ 를 무부하시 출력전압이라고 한다면 그림 4와 같이  $\Delta V_{AC}$ ( $V_C$ 와  $V_A$ 의 차이)가 채널 1의 원천성분에 의한 이득에 따른 전압의 크기인  $V_{11}$ 보다 작거나 같을 경우에는 진폭 변조만으로 출력전압을 제어할 수 있다. 하지만 조건을 만족시키지 못하는 경우는 간섭의 영향이 크기 때문에 진폭 변조만으로 제어할 수 없다. 이와 같이 경부하나 무부하 시 진폭 변조에 주파수 변조를 같이 이용하여 출력전압을 제어할 수 있다.

### 2.4 제안하는 시스템의 하드웨어 실험 결과

그림 5은 4개의 출력을 가진 제안하는 컨버터의 하드웨어 프로토타입을 나타낸다. 무선 트랜스포머의 구조는 바닥의 검은색 부분이 1차측 권선이고 각 채널간 간섭을 최소화하는 구조로 네 개의 2차측을 원형으로 제작한 후 일렬로 배치하였다. 표 1은 제안하는 컨버터 하드웨어 프로토타입의 주요 파라미터를 나타낸다. 그림 6은 제안하는 시스템의 출력전압 제어의 퍼포먼스를 검증하기 위해 채널 3번 출력을

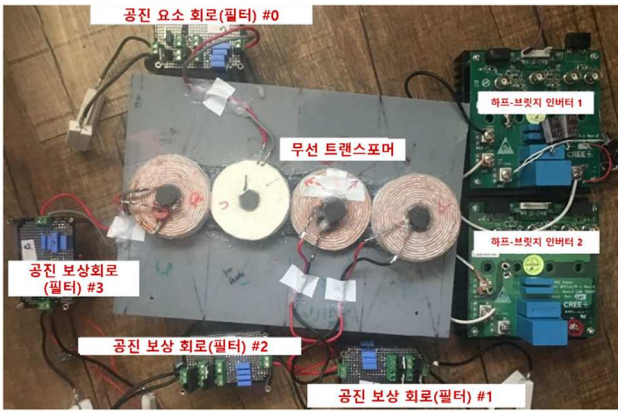


그림 5. 제안하는 시스템의 하드웨어 프로토타입

표 1 제안하는 시스템의 주요 하드웨어 파라미터

Parameters [unit]	Values
$V_{DC}, V_0, V_1, V_2, V_3$ [V]	180, 24, 20, 18, 12
$R_0, R_1, R_2, R_3$ [ $\Omega$ ]	20, 12, 12, 12
steady-state load resistance	
$N_p:N_{S0}:N_{S1}:N_{S2}:N_{S3}$	1:0.9:1.43:1.6:1.9
$L_0, L_1, L_2, L_3$ [ $\mu$ H]	18.2, 15.3, 40.5, 55, 82
$C_x, C_0, C_1, C_2, C_3$	50[uF], 6.6[nF], 10.5[nF], 11.4[nF], 12[nF]
$L_{m1}, L_{m2}, L_{m3}, L_{m4}$ [ $\mu$ H]	3.15, 1.75, 1.55, 1.56
Coupling Coefficient [ $k_0, k_1, k_2, k_3$ ]	0.12, 0.21, 0.27, 0.32
$f_0, f_1, f_2, f_3$ [kHz]	90, 115, 150, 480-540

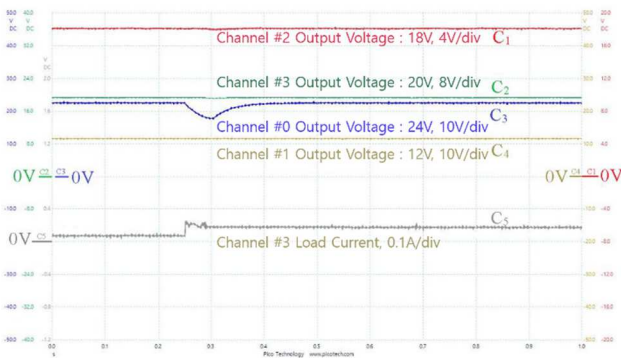
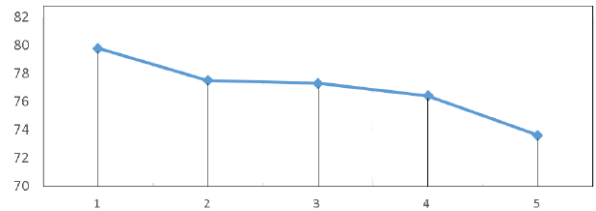


그림 6. 부하 변동(정격부하→50%부하)에 따른 출력전압 제어



그림 7. 입력 전압 변동(175V→195V)에 따른 출력전압 제어.

### EFFICIENCY PROFILE



output #1	100%	50%	100%	100%	100%
output #2	100%	100%	100%	50%	100%
output #3	100%	100%	50%	100%	100%
output #4	100%	100%	100%	100%	50%

그림 8. 제안하는 시스템의 각 출력의 부하조건에 따른 효율

정격부하에서 50%의 경부하로 낮췄을 때 각 출력들의 결과 파형이다. 또한 그림 7은 입력전압의 변동에 따른 출력전압 제어를 보여준다. 175V의 입력 전압에서 195V로 증가시켰을 때에도 출력전압이 제어됨을 검증하였다.

그림 8은 네 개의 출력의 부하 조건에 따른 효율 프로파일을 나타낸다.

### 3. 결론

기존의 공진형 다출력 시스템에서는 한 개의 컨트롤 변수로 다출력을 제어함에 따라 출력전압의 조절이 용이하지 않았고 트랜스포머의 개수가 각 출력마다 하나씩 연결되어야 하며 출력의 개수가 제한될 수 있는 단점이 있었다. 제안하는 시스템은 무선전력전송 시스템으로서 무선 트랜스포머의 공극이 매우 넓어 파워스테이지 설계 시 낮은 Q값으로 설계해야 한다. 기존의 시스템의 단점을 보완하기 위하여 하나의 무선 트랜스포머를 사용하면서 낮은 Q 값으로 설계된 상태의 파워스테이지가 경부하 및 무부하 상태에서도 출력전압의 제어가 용이하도록 진폭 변조와 주파수 변조를 모두 사용하는 하이브리드 방식을 사용하여 제어하였다. 설계 시 반드시 고려해야 하는 요소를 분석했으며 400W급 하드웨어 프로토타입을 통해 제안하는 시스템을 검증하였다.

### 참고 문헌

- [1] Hirofumi Matsuo, "Comparison of Multiple-Output DC-DC Converters Using Cross Regulation", IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, Vol. IECI-27, No. 3, August 1980.
- [2] Kyusik Choi, Jung-Hu Park, and Bo-Hyung Cho, "A Novel Multiple-Output Converter using Band-pass Filters", in Proc. IEEE INTELEC'2009, pp. 1-4, 2009.
- [3] Hector Sarnago, Óscar Lucía, Mario Pérez-Tarragona, "Dual-Output Boost Resonant Full-Bridge Topology and its Modulation Strategies for High-Performance Induction Heating Applications", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 6, pp. 3554-3561, June 2016.
- [4] Daniel Thenathayalan Issac, "Independent Regulation of Multiple Output Wireless Power Transfer System Using a Single Pulse Width Modulation Signal", Graduate School of Soongsil University, Seoul