

다상 코일 패드가 적용된 50 kW 급 무선 충전 시스템의 고효율 동작을 위한 보상 네트워크 설계 및 제어 방안

곽기준, 이주아, 심동현, 조현우, 김채린, 이병국[†]
성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Compensation Network Design and Control Strategy for High Efficiency Operation of 50 kW Multi-Phase Wireless Charging System

Gi Jun Kwak, Ju-A Lee, Dong Hyeon Sim, Hyeonu Jo, Chae-Lyn Kim, Byoung Kuk Lee[†]
Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 다상 코일 송·수신 패드가 적용된 무선 충전 시스템에서 정렬 오차에 따른 결합 성능 변화를 고려한 보상 네트워크 설계 방안을 제안하고, 정렬 오차에 따른 임피던스 특성 변화를 보상할 수 있는 임피던스 매칭 제어기법을 소개한다. PSIM 시뮬레이션을 통해 제어기법이 적용된 무선 충전 시스템의 성능을 검증하고 제어기법이 적용되지 않은 시스템과의 손실 비교를 통해 제안하는 무선 충전 시스템의 우수성을 검증한다.

1. 서 론

최근 전기 자동차 (Electric vehicle, EV) 무선 충전 인프라 상용화가 진행됨에 따라 충전 속도 향상을 위해 다상 코일이 적용된 대용량 무선 충전 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그림 1과 같은 형상의 다상 코일 패드는 송·수신 패드 내 여러 코일이 전력 전달 기능을 수행함에 따라 단일 코일에 비해 대용량 무선 전력 전송에 유리한 특징을 갖는다. 이러한 다상 코일 패드를 구동하기 위해서는 개별 코일로의 전력 공급이 가능한 전력변환회로 설계가 필수적이다. 그림 2는 3상 코일 구동을 위해 제안된 open-ended 구조의 무선 충전 시스템 회로도를 나타낸다^[1]. Leg 1에서 S_1 , S_8 과 S_2 , S_7 은 각각 동기화되어 동작하며, S_1 과 S_8 이 on일 경우 A coil 보상 네트워크에 양의 전압, S_2 와 S_7 이 on일 경우 음의 전압이 인가된다. 즉, 각 인버터의 switching leg가 더해져 하나의 H-bridge 인버터와 동일한 동작을 수행한다. Leg 2와 leg 3 역시 leg 1과 동일하게 동작하며, B coil 및 C coil로의 전력 공급을 담당한다. 이때 각 leg의 switching 신호는 120° 위상차를 갖는다. 이러한 방식으로 동작하는 open-ended 구조는 출력 리플 저감에 따른 출력 커패시터 저감과 더불어 송·수신 패드 내 개별 코일의 인덕턴스 변화 양상을 고려한 보상 네트워크 최적 설계가 가능하고, 대용량 시스템을 위한 하드웨어 구현이 용이하다는 장점이 있다.

하지만, 다상 코일 적용 무선 충전 시스템에서 개별 코일의 구동 주파수는 항상 동일하게 유지되어야 하는 반면, 정렬 오차에 따른 코일의 인덕턴스는 서로 다른 양상을 보이며 변화하고, 변화량 또한 상이하므로 스위칭 주파수를 통한 ZPA (Zero phase angle) 추종 제어가 불가하다는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해서는 개별 코일의 인덕턴스 변화 양상을 고려한 보상 네트워크 설계 및 정렬 오차 발생에 따른 인덕턴스 변화를 보상하는 임피던스 매칭 기법의 적용이 필수적이다.

따라서 본 논문에서는 그림 1(d)의 패드를 사용하여 그림 2의 open-ended 회로 구조를 적용한 50 [kW] 급 무선 충전 시스템의 설계 및 제어기법을 제안한다. 먼저, 정렬 오차에 따른

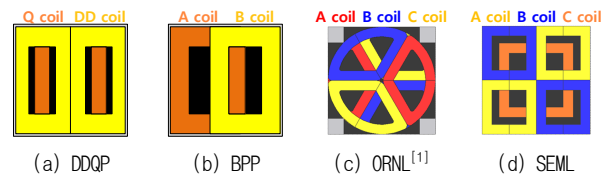


그림 1 다상 코일 패드 형상

Fig. 1 Shape of multi-phase coil pad.

표 1 코일 간 결합계수 및 코일 인덕턴스 측정 결과

Table 1 Measurement results of coupling coefficients and coil inductance

Parameter		A coil	B coil	C coil
결합계수 (k)	a coil	0.063~0.301	0.001~0.042	0.001~0.233
	b coil	0.001~0.042	0.063~0.301	0.001~0.233
	c coil	0.001~0.233	0.001~0.233	0.090~0.363
Parameter		A상	B상	C상
L_p [μH]	최대	89.143	88.903	104.825
	최소	81.287	81.450	97.809
L_s [μH]	최대	41.758	41.633	53.941
	최소	39.433	39.466	51.029

패드 인덕턴스 및 결합계수 변화 양상을 확인하고, 이를 고려한 보상 네트워크를 설계한다. 더불어 정렬 오차 발생에 따른 충전 성능 저하를 방지하는 tunable 커패시터 기반의 임피던스 매칭 기법을 소개한다. 다음으로 PSIM 시뮬레이션을 통해 다양한 정렬 오차 발생 상황을 가정하여 제안하는 설계 및 제어 기법이 적용된 무선 충전 시스템의 동작 검증을 실시하고, 제어 기법 적용 여부에 따른 손실 비교를 통해 제안하는 시스템의 우수성을 검증한다.

2. 다상 코일 적용 무선 충전 시스템의 보상 네트워크 설계 및 검증

2.1 코일 형상 해석 기반 결합성능 분석

그림 1(d)의 패드는 3개의 코일로 구성되어 있다. 코일 구성 중 C 코일은 CP (Circular pad)와 동일한 형태로 수직 자속을 생성하고, A, B 코일은 각각 DDQ (Double-D pad)와 유사한 형태로 수평 자속을 생성한다. 본 논문에서는 그림 3과 같이 송신 패드의 크기를 544 × 544 [mm²], 수신 패드의 크기를 435 × 435 [mm²]로 가정하여 JMAG 시뮬레이션 모델을 구성하고, 이를 통해 정렬 오차에 따른 결합계수 및 코일 인덕턴스 측정을 진행하였다. 정렬 오차 국제 표준 규격 SAE J2954에서 제시하는 허용 범위를 포함하는 (X: ±100 [mm], Y: ±100 [mm], Z: 100~170mm)로 제한하였으며, 측정 결과는 표 1과 같다. 이를 통해 동일한 상의 송·수신 코일 간 결합성능이 가장 우수하며,

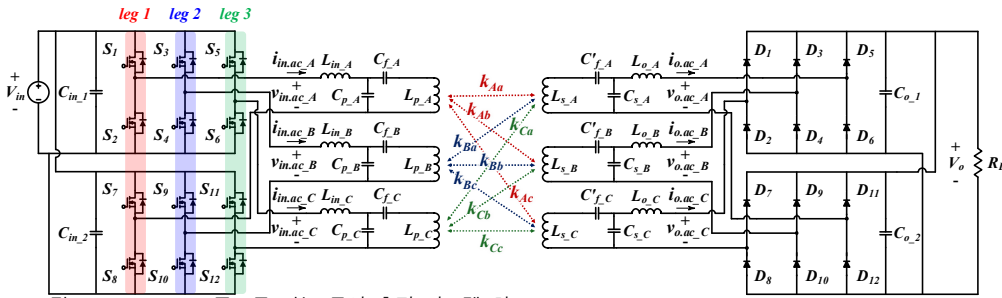


그림 2 Open-ended 구조를 갖는 무선 충전 시스템 회로도
Fig. 2 Circuit diagram of a wireless charging system with open-ended structure.

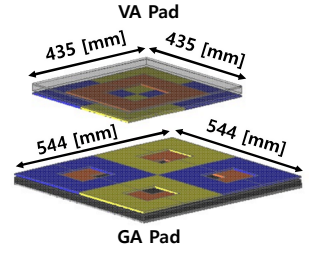


그림 3 JMAG 시뮬레이션 모델
Fig. 3 JMAG simulation model.

표 2 보상 네트워크 설계 조건
Table 2 Design point for compensation network

Parameter	Value			
X, Y, Z 축 [mm]	(0, 0, 170)			
입출력 전압 (V_{in} / V_o) [V]	600 / 850			
출력 전력 (P_o) [kW]	50			
공진주파수 (f_o) [kHz]	85			
Parameter	A coil	B coil	C coil	
결합계수 (k)	a coil	0.136	0	0
	b coil	0	0.136	0
	c coil	0	0	0.174
L_p [μ H]	82.401	82.458	97.809	
L_s [μ H]	39.653	39.555	51.126	

표 3 LCC-LCC 보상 네트워크 설계 결과
Table 3 Results of LCC-LCC compensation network

Parameter	A 상	B 상	C 상	
송신측	L_{in} [μ H]	15.5	15.5	19
	C_p [nF]	226.189	226.189	184.522
	C_f [nF]	52.36	52.36	44.2
수신측	L_o [μ H]	20.5	20.5	26.5
	C_s [nF]	171.021	171.021	132.299
	C'_f [nF]	183.052	183.985	142.368

$$P_o = V_{o,ac} \cdot I_{o,ac} = \frac{\sqrt{L_p L_s}}{\omega_o L_{in} L_o} \cdot k V_{in,ac} V_{o,ac} \quad (1)$$

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_o C_s}} = \frac{1}{\sqrt{C_p L_{in}}} \quad (2)$$

$$j\omega_o L_o = j\omega_o L_s + \frac{1}{j\omega_o C'_f}, \quad j\omega_o L_{in} = j\omega_o L_p + \frac{1}{j\omega_o C_f} \quad (3)$$

A, B 코일 간 결합 성능은 정렬 오차에 관계없이 매우 낮음을 알 수 있다.

2.2 보상 네트워크 설계 및 시뮬레이션 검증

본 논문에서는 표 2와 같이 송·수신 패드 간 수평 이격이 없고 수직 이격이 최대인 (0, 0, 170) 조건을 기준으로 보상 네트워크를 설계하였다. 이는 해당 조건에서 수평 이격이 발생하지 않아 각 코일의 결합성능이 평형을 이루므로 동등 조건에서 보상 네트워크 설계가 가능하며, 수직 이격이 최대인 조건에서 목표 출력을 달성하는 보상 네트워크를 설계함으로써 전체 정렬 오차 허용 범위 내에서 충분한 전력 전달 성능을 확보할 수 있기 때문이다. 또한, 본 논문에서는 보상 네트워크를 구성하는 수동 소자의 전압, 전류 정격을 고려하여 대용량 시스템에 적용 시 하드웨어 구현에 부담이 적은 LCC-LCC 보상 네트워크를 선정하였다.

기본과 해석 기반의 수식 분석을 통해 LCC-LCC 보상 네트워크의 출력 전력은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (1)에

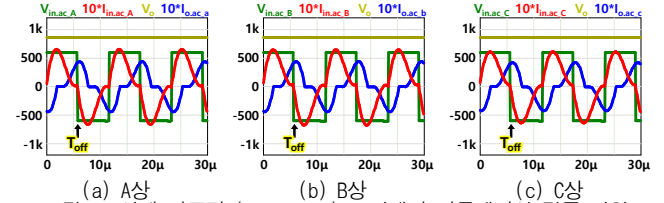


그림 4 설계 기준점 (0, 0, 170) 조건에서 시뮬레이션 검증 파형
Fig. 4 Simulation waveforms at the design point (0, 0, 170).

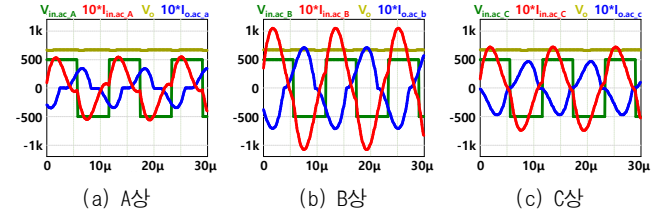


그림 5 이격 거리 (-100, 100, 100) 조건에서 시뮬레이션 검증 파형
Fig. 5 Simulation waveforms at the (-100, 100, 100).

송·수신 코일의 인덕턴스 (L_p , L_s) 및 결합계수 (k) 등이 포함된 설계 조건을 대입하면 L_{in} 과 L_o 를 곱한 값의 크기가 결정되고, 이에 대한 비율 조절을 통해 L_{in} , L_o 의 값을 결정할 수 있다. 이때, 각 보상 네트워크의 출력 전력은 50 [kW]의 1/3에 해당하는 약 16.67 [kW]를 만족하도록 설계되어야 한다. 설계된 L_{in} , L_o 값을 기준으로 나머지 보상 네트워크 파라미터는 식 (2), (3)과 같이 공진 주파수에서 공진 회로를 구성하는 리액턴스 합이 0이 되도록 설계한다. 표 3은 설계 결과를 나타내며, 이에 따른 시뮬레이션 검증 결과는 그림 4와 같다. 이를 통해 설계 기준점에 3상 모두 공진점 부근에서 동작함에 따라 보상 네트워크 입력 전류가 스위치 turn-off 시점 (T_{off})에서 약 5~10 [A] 수준으로 매우 작은 것을 알 수 있다. 또한, 각 상의 결합성능이 평형을 이루며 보상 네트워크 입·출력 전류의 크기가 모두 동일한 것을 통해 상당 출력 전력 또한 약 16.67 [kW]로 균형을 이루는 것을 알 수 있다.

3. 임피던스 매칭 제어기법의 구현 및 검증

3.1 임피던스 매칭 제어기법의 필요성

그림 5는 송·수신 패드 간 이격 거리가 (-100, 100, 100)인 조건에서 시뮬레이션 파형을 나타낸다. 그림 4의 파형과 달리 보상 네트워크 입력 전류가 T_{off} 시점에서 음의 값을 가지며, 역회복 전류에 의한 스위치 소손을 야기하는 ZCS turn-off 동작이 발생함을 알 수 있다. 이는 정렬 오차에 의해 송·수신 코일의 인덕턴스가 변화함에 따라 보상 네트워크 입력 임피던스의 용량성 특성이 증가하기 때문이다. 이러한 경우에 무선 충전 시스템은 해당 정렬 오차 조건에서 충전 동작 수행이 불가하며, SAE J2954에서 제안하는 정렬 오차 허용 범위 조건을 만족하지 못하게 되는 문제가 있다. 실제로 본 논문에서 제시한 보상 네트워크 설계 결과를 다양한 정렬 오차 조건에 적용해본 결과 설계 기준점이 위치한 Z 이격 170 [mm] 조건에 대해서만 수평

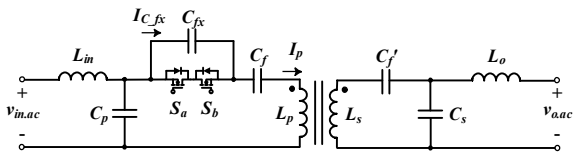
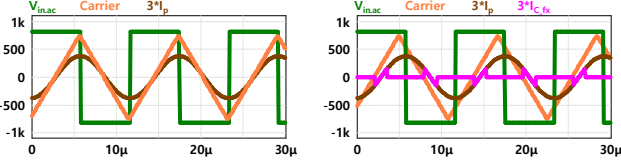


그림 6 Tunable 커패시터가 적용된 보상 네트워크 회로도
Fig. 6 Circuit diagram of a compensation network with tunable capacitors.



(a) 합성 커패시턴스 = C_f (b) 합성 커패시턴스 < C_f
그림 7 임피던스 매칭 제어 회로의 동작 방식
Fig. 7 Simulation waveforms before and after applying impedance matching control technique.

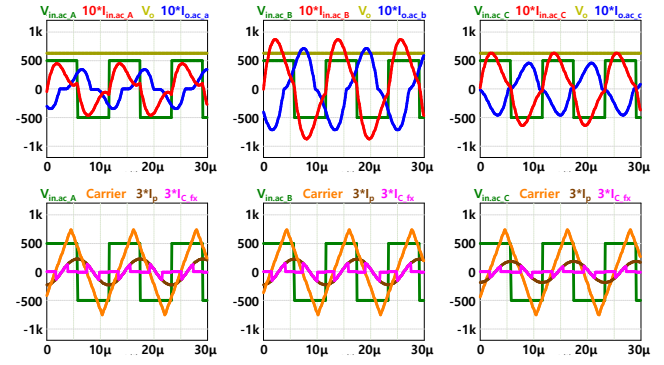
이격에 관계없이 충전 동작이 가능했으며, Z 이격이 감소할 경우 ZCS 동작에 의해 충전 동작이 불가능함을 확인하였다.

3.2 임피던스 매칭 제어기법의 구현 및 검증

그림 6은 tunable 커패시터 기반의 임피던스 매칭 제어기법 적용을 위한 보상 네트워크 회로도를 나타낸다. 이는 기존 보상 네트워크 회로에서 커패시터 C_A 와 back-to-back 스위치 S_a , S_b 가 추가된 형태이다. 이러한 tunable 커패시터 기반의 제어 회로는 그림 7(a)와 같이 S_a , S_b 를 제어하는 carrier의 위상이 I_p 전류와 동기화되어 양의 반주기 동안에는 S_b 가 on되어 S_a 의 역병렬 다이오드와 S_b 의 채널을 통해 I_p 전류가 도통하고, 음의 반주기 동안에는 S_a 가 on되어 양의 반주기와 반대되는 동작을 수행한다. 이때, 그림 7(b)와 같이 carrier의 위상을 I_p 전류보다 앞서게 설정할 경우 각 스위치의 채널로 도통하는 시간이 감소함에 따라 C_A 로 흐르는 전류 ($I_{C,A}$)가 증가하여 C_f 와 C_A 의 합성 커패시턴스가 감소한다. 따라서 L_p , L_s 변화에 따른 임피던스 변화분을 상쇄하여 정렬 오차 발생 시에도 보상 네트워크의 공진 주파수를 일정하게 유지할 수 있다. 이러한 제어기법을 적용하기 위해서는 I_{in} 전류 센싱을 통해 T_{off} 시점의 전류 크기를 파악하는 과정이 선행되어야 한다. 만약, T_{off} 시점의 전류가 5 [A] 이하일 경우 보상 네트워크 내 용량성 임피던스 성분이 증가한 것을 의미하므로 C_A 로의 전류량을 늘려 합성 커패시턴스를 감소시킨다. 반대로, T_{off} 시점의 전류가 10 [A] 이상일 경우에는 보상 네트워크 내 유도성 임피던스 성분이 증가한 것을 의미하므로, C_A 로의 전류량을 줄여 합성 커패시턴스를 증가시킨다. 이러한 tunable 커패시터 기반의 임피던스 매칭 기법은 각 상에 적용되어 ZCS 동작을 방지하고 표준 규격에서 제시하는 정렬 오차 허용 범위 내 모든 조건에서 공진점 부근 동작을 유지할 수 있도록 한다.

그림 8은 그림 5와 동일한 이격 거리 조건에서 임피던스 매칭 제어기법이 적용되었을 경우의 시뮬레이션 파형을 나타낸다. 제어기법이 적용되지 않은 그림 5 파형과 달리 ZCS 동작 문제가 해결된 것을 통해 제안하는 제어기법의 성능을 확인할 수 있다. 또한, carrier와 I_p 전류의 위상차가 증가함에 따라 $I_{C,A}$ 전류 도통 시간이 증가하는 것을 통해 각 상의 인덕턴스 변동분에 대하여 적절하게 임피던스 매칭 제어가 수행되었음을 확인할 수 있다.

하지만 임피던스 매칭 제어가 적용됨에 따라 각 보상 네트워크에 2개의 스위치와 1개의 커패시터가 추가되어 전체 시스템에서 총 6개의 스위치와 3개의 커패시터가 추가되므로 시스템 효율 저하에 대한 우려가 존재할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 표 3의 보상 네트워크 설계 결과를 적용한 상태에서 임피던스



(a) A상 (b) B상 (c) C상
그림 8 제어기법 적용 후 이격 거리 (-100, 100, 100) 조건에서 시뮬레이션 검증 파형

Fig. 8 Simulation waveforms after applying impedance matching control technique at the (-100, 100, 100).

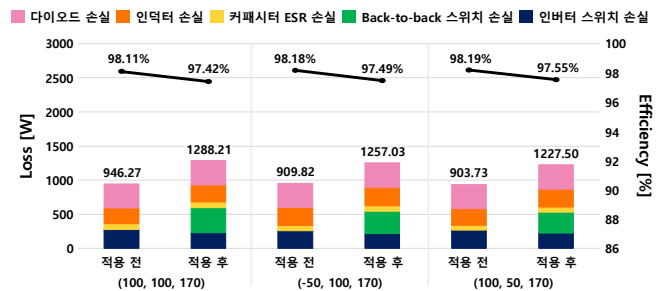


그림 9 임피던스 매칭 제어기법 적용 여부에 따른 손실 분석
Fig. 9 Loss analysis based on the application of impedance matching control technique.

제어기법 적용 여부에 따른 손실 분석을 진행하였으며, 그 결과는 그림 9와 같다. 앞서 3.1절에서 언급하였듯이 임피던스 매칭 제어가 적용되지 않는 경우 Z는 170 [mm] 조건에 한하여 충전 동작이 가능하므로 손실 분석은 Z 이격을 고정한 채로 수평 이격만을 변화시킨 조건에 대해서 수행되었으며, 송·수신 패드에서 발생하는 손실은 제외하였다. 결과적으로 제어기법 적용에 따라 back-to-back 스위치에 의해 최대 347.21 [W]의 추가 손실이 발생하지만, 이는 약 0.69% 수준의 효율 저하만을 유발하므로 전체 시스템 효율에 미치는 영향이 매우 적다. 게다가 제어기법을 적용할 경우 정렬 오차 허용 범위 내 100% 충전 동작 수행이 가능한 점을 고려하면 제안하는 제어기법이 매우 높은 수준의 활용 가치를 가졌음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 다상 코일 송·수신 패드를 적용한 50 [kW] 급 무선 충전 시스템에서 정렬 오차에 따른 결합 성능 변화를 고려하여 보상 네트워크 설계하고, 임피던스 특성 변화를 보상하는 tunable 커패시터 기반의 임피던스 매칭 제어기법을 적용하였다. 이후, PSIM 시뮬레이션을 통해 정렬 오차 허용 범위 내에서의 무선 충전 시스템의 동작을 검증하고 제어기법 적용 여부에 따른 손실 비교를 통해 제안하는 시스템의 우수성을 검증하였다.

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0025182)

참고 문헌

[1] O. Onar, et al., "A 100-kW Wireless Power Transfer System Development Using Polyphase Electromagnetic Couplers," in *Proc. IEEE Transp. Electric. Conf. Expo.*, pp. 273-278, June, 2022.