

자계결합도의 변동을 고려한 전기차 충전용 무선전력전송회로 설계

오광교

한국생산기술연구원 동력부품소재그룹

Design of Wireless Charging Circuits for Electric Vehicles Considering Magnetic Coupling Tolerance

Kwang Kyo Oh

Automotive Components and Materials R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology

ABSTRACT

본 논문에서는 권선 사이의 자계결합도 변동을 고려한 자기공진 방식의 전기차 충전용 무선전력전송회로의 설계기법을 제시한다. 자기공진 방식의 전기차 충전용 무선전력전송회로는 LLC 공진형 컨버터와 동작원리가 유사하지만 설계측면에서는 회로의 동작주파수가 표준규격에 의해서 일정범위로 제한되고 1차측과 2차측 권선의 정렬상태에 따라서 자계결합도가 변동할 수 있다는 점에서 LLC 컨버터와는 차이가 있다. 본 논문에서는 동작주파수의 제한범위 및 자계결합도의 변동을 고려한 무선전력전송회로의 설계기법을 제시하는 한편, 시뮬레이션을 통하여 설계를 검증한다.

1. 서론

최근, 국제 유가의 상승세와 변동성 증가, 글로벌 대기오염 심화와 지구 온난화 등으로 전기 자동차에 대한 관심이 고조되고 있다. 전기 자동차의 보급에 필수적인 요소의 하나로 안전하고 편리한 충전 인터페이스가 요구되고 있으나 기존의 플러그인 충전 인터페이스는 사용절차가 복잡하고 안전성과 신뢰성 측면에서 잠재적인 문제를 내포하고 있다.

이에 따라, 플러그인 충전방식의 대안으로서 무선전력전송을 통해서 전기 자동차의 배터리를 충전하는 방식이 주목받고 있다. 무선충전 방식은 기존의 플러그인 방식에 비해서 전력전송 효율이 낮다는 단점이 있으나 최근 미국의 Witricity 등 해외 무선전력전송 전문기업들을 중심으로 90% 수준의 양호한 전송 효율을 갖는 시제품이 출시되었고 일본의 Toyota 등 완성차 업체를 중심으로 상용화를 위한 실증연구가 진행되는 등, 전기 자동차 무선충전 기술개발이 본격화 될 것으로 전망되고 있다.

무선전력전송 기술은 크게 자기유도 방식, 자기공진 방식, 전자기파 방식 등으로 분류되는데, 전력전송 거리가 15cm 내외로 비교적 짧은 반면, 전력전송 용량이 크고 높은 전송효율이 요구되는 전기 자동차 충전에는 자기공진 방식이 가장 적합한 것으로 알려져 있다. 자기공진 방식의 무선전력전송회로는 그 동작원리가 LLC 공진형 컨버터와 유사하기 때문에 설계에 있어서도 LLC 컨버터 설계기법을 차용할 수 있다. 하지만, 전기 자동차 충전을 위한 무선전력전송회로의 경우, 이중의 송전단과 수신단의 상호 운용성 확보를 위해서 회로의 동작주파수를 일정한 범위로 제한하여야 하고 차량의 주차상태에 따라서 송전단과 수신단 사이의 자계결합 강도가 변동할 수 있다는 점을 설계시에 고려하여야 한다.

본 논문에서는 이러한 점에 주목하여, 자계결합도가 일정한 수준으로 변동하더라도 무선충전회로가 주어진 범위의 동작주파수로 구동되는 것을 보장하는 설계기법을 제시한다. 또한, 제시된 설계기법을 검증하기 위해 시뮬레이션 결과를 제시한다.

2. 자기공진형 무선충전회로 설계기법

2.1 개요

전기차 충전을 위한 무선전력전송회로는 그림 1과 같은 자기공진형 토폴로지가 적합한 것으로 알려져 있다^[1]. 그림 2의 등가회로는 라플라스 변환을 통해 다음과 같은 전압방정식으로 기술된다.

$$V_p(s) = (R_p + sL_p + \frac{1}{sC_p})I_p(s) + sM_{ps}I_s(s), \quad (1)$$

$$V_s(s) = sM_{ps}I_p(s) + (R_s + sL_s + \frac{1}{sC_s})I_s(s).$$

여기서, 1차측과 2차측의 자기결합도를 k_{ps} 라고 표기하면 $M_{ps} = k_{ps} \sqrt{L_p L_s}$ 이다.

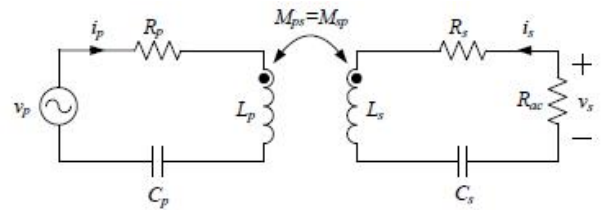


그림 1 자기공진형 무선전력전송회로

Fig. 1 Equivalent circuit for the two-coil WPT system

한편, 자기공진형 무선전력전송회로의 설계에 있어서는 통상적으로 1차측과 2차측의 인덕터 및 커패시터가 다음의 조건을 만족하도록 설계된다^[1].

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_p C_p}} = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}}. \quad (2)$$

이 경우, 그림 2의 회로는 ω_0 와 $\omega_{0-} = 1/\sqrt{(1-k_{ps})L_p C_p}$ 및 $\omega_{0+} = 1/\sqrt{(1+k_{ps})L_p C_p}$ 에 해당하는 주파수와 관련된 공진점을 갖는다는 것을 알 수 있다.

2.2 설계절차 및 설계

무선전력전송회로 설계를 위한 시스템 사양은 다음과 같다.

표 1 무선전력전송회로 시스템 사양

Table 1 System specification for the WPT circuit

입력전압	DC 400V
출력전압	DC 400V
출력용량	3.3kW
동작주파수	80~90kHz
자기결합도	0.25±10%

동작주파수는 미국 자동차공학회를 중심으로 85kHz 내외의 주파수를 규격으로 제정하려는 움직임이 있다는 점을 고려하였다.

동작주파수 공칭값을 ω_0 로 두고 자기결합도의 변동시에 공칭값이 범위 내에 존재하면서 공칭 주파수에서의 전압전달비가 1이 되도록 하면 다음 식을 얻는다.

$$80kHz \leq \frac{1}{2\pi\sqrt{(1-k_{ps})L_pC_p}} \leq 90kHz, \quad (3)$$

$$\frac{\sqrt{L_s}}{\sqrt{L_p}} = 1$$

또한, ω_0 에서는 공진에 의해서 전압 전달비가 매우 커지는 점을 감안하면 다음의 식을 설계조건식으로 둔다.

$$1/(2\pi\sqrt{L_pC_p}) < 80kHz \quad (4)$$

다음으로 인덕터의 사양을 결정하기 위해서 이하와 같이 2차측 전류의 RMS 값을 구한다. 표 1에 주어진 사양에 의해 그림 1에서 출력단의 저항은 대략 38.3Ω이므로 따라서 2차측의 RMS 전류는 약 9.28A가 된다. 2차측 인덕터의 경우, 해당 RMS 전류에 대해서 도통손실이 합리적인 수준을 유지하도록 설계를 할 수 있다. 2차측 인덕턴스를 결정하면 식 (3)과 (4)를 고려하여 1차측 인덕턴스와 커패시턴스를 결정할 수 있고 식 (2)를 이용하여 2차측 커패시턴스를 구할 수 있다.

설계 예를 제시하기 위해서 1차측과 2차측 코일의 공칭 자기 결합도가 0.25이고 충전조건에서 ±10% 수준에서 변동한다고 가정하자. 이 경우, 1차측과 2차측의 인덕턴스와 커패시턴스는 위의 설계절차에 의해 각각 150uH와 30nF으로 선정할 수 있다. 편의상 코일의 저항을 무시하고 자기 결합도의 변화에 따른 부하별 전압전달함수의 주파수 응답특성을 그림 2과 3에 도시하였다. 그림을 통해 확인할 수 있듯이 전압전달비가 1이 되는 주파수가 동작주파수 범위 내에 존재하므로 주파수 가변을 통해서 원하는 출력전압을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

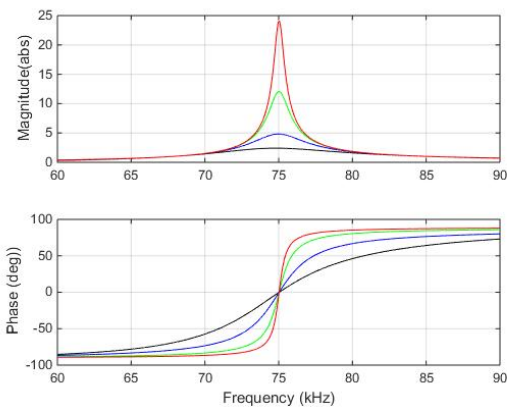


그림 2 자기결합도 10% 감소시의 주파수 응답
Fig. 2 Frequency response for WPT with 10% decreased magnetic coupling

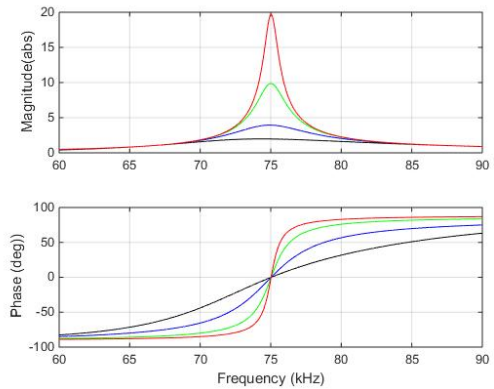


그림 3 자기결합도 10% 증가시의 주파수 응답
Fig. 3 Frequency response for WPT with 10% increased magnetic coupling

그림 4는 공칭 주파수로 동작시킨 경우의 1차측과 2차측의 전류파형을 나타내고 있다.

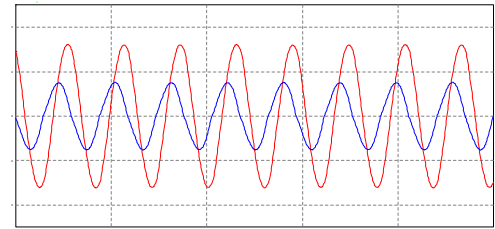


그림 4 85kHz 동작시의 1차측과 2차측의 전류파형

Fig. 4 Current waveforms with 85kHz switching frequency

3. 결론

본 논문에서는 권선 사이의 자계결합도 변동을 고려한 자기공진 방식의 전기차 충전용 무선전력전송회로의 설계기법을 제시하고 시뮬레이션을 통해서 검증하였다. 자기공진 방식의 전기차 충전용 무선전력전송회로는 LLC 공진형 컨버터와 동작 원리가 유사하지만 설계 측면에서는 회로의 동작주파수가 표준 규격에 의해서 일정범위로 제한되고 1차측과 2차측 권선의 정렬상태에 따라서 자계결합도가 변동할 수 있다는 특징이 있다. 본 논문에서는 동작주파수의 제한범위 및 자계결합도의 변동을 고려한 무선전력전송회로의 설계기법을 제시하는 한편, 시뮬레이션을 통하여 설계를 검증하였다.

이 논문은 한국생산기술연구원 기관고유사업(PER15260)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

[1] SangCheol Moon, Bong Chul Kim, Shin Young Cho, Chi Hyung Ahn, and Gun Woo Moon, "Analysis and Design of a Wireless Power Transfer System an Intermediate Coil for High Efficiency", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 11, pp. 5861-5870, 2014, Nov.