

보조권선을 포함하는 전기차 충전용 무선전력전송회로 설계기법

오광교

한국생산기술연구원 동력부품소재그룹

Design of Wireless Electric Vehicle Charging Circuits with Intermediate Coil

Kwang Kyo Oh

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

ABSTRACT

본 논문에서는 권선 사이의 자계결합도 변동을 고려하여 자기공진 방식의 보조권선을 포함하는 전기차 충전용 무선전력전송회로의 설계기법을 제시한다. 전기차 충전용 무선전력전송회로를 설계하기 위해서는 회로의 동작주파수가 표준규격에 의해서 일정범위로 제한되고 1차측과 2차측 권선의 정렬상태에 따라서 자계결합도가 변동할 수 있다는 점이 고려되어야 한다. 본 논문에서는 동작주파수의 제한범위 및 자계결합도의 변동을 고려하여 1차측에 보조권선을 포함하는 자기공진형 무선전력전송회로의 설계기법을 제시한다.

1. 서론

최근, 대기오염으로 인한 지구온난화 문제의 대두 및 국제 유가의 상승세와 변동성 증가 등으로 인해 친환경 전기 자동차에 대한 관심이 높아지고 있다. 전기 자동차의 보급에 필수적인 요소의 하나로 안전하고 편리한 충전 인터페이스가 요구되고 있으나 기존의 플러그인 충전 인터페이스는 사용절차가 복잡하고 안전성과 신뢰성 측면에서 잠재적인 문제가 있다.



그림 1 플러그인 충전방식의 문제점
Fig. 1 Potential problems of plugin-charging

플러그인 충전방식의 대안으로서 무선전력전송을 통해서 전기 자동차의 배터리를 충전하는 방식이 주목받고 있다. 전기차 무선충전 방식은 전송거리를 고려할 때, 자기공진 방식이 적절한 것으로 알려져 있는데, 참고문헌 [1]에서는 보조권선을 포함

하는 무선전력전송회로의 설계를 다루었는데, 자계결합도의 변동에 따른 출력전압의 변동에는 주목하지 않았다.

본 논문에서는 보조권선을 갖는 전기차 충전용 무선전력전송회로의 설계에 있어서 자계결합도가 일정한 수준으로 변동하더라도 회로가 주어진 범위 내의 동작주파수 가변을 통하여 적절한 출력전압 레벨을 유지하기 위한 설계기법을 제시한다.

2. 자기공진형 무선충전회로 설계기법

2.1 개요

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

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

$$V_s(s) = sM_{ps}I_p(s) + \left(\frac{1}{sC_s} + sL_s\right)I_s(s) + sM_{st}I_t(s),$$

$$0 = sM_{pt}I_p(s) + sM_{st}I_s(s) + \left(\frac{1}{sC_t} + sL_t\right)I_t(s)$$

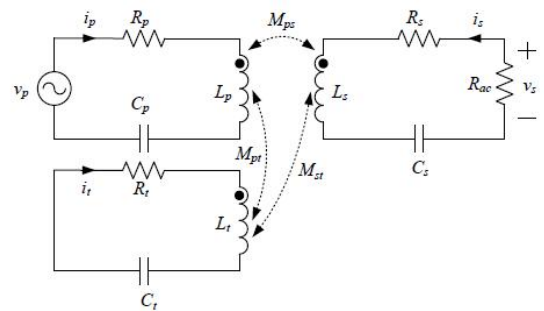


그림 2 자기공진형 무선전력전송회로
Fig. 2 Equivalent circuit for the three-coil WPT system

한편, 앞서 살펴 본 전압방정식을 이용하여 보조코일의 전류는 나타내면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$I_t(s) = -\frac{s^2 M_{pt} C_t}{1 + s^2 L_t C_t} I_p(s) - \frac{s^2 M_{st} C_t}{1 + s^2 L_t C_t} I_s(s). \quad (2)$$

또한, 위의 식을 전압방정식에 대입하면 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$V_p(s) = \left(\frac{1}{sC_p} + sL_p - \frac{s^3 M_{pt}^2 C_t}{1 + s^2 L_t C_t} \right) I_p(s) + (sM_{ps} - \frac{s^3 M_{pt} M_{st} C_t}{1 + s^2 L_t C_t}) I_s(s),$$

$$V_s(s) = (sM_{ps} - \frac{s^3 M_{pt} M_{st} C_t}{1 + s^2 L_t C_t}) I_p(s) + \left(\frac{1}{sC_s} + sL_s - \frac{s^3 M_{st}^2 C_t}{1 + s^2 L_t C_t} \right) I_s(s).$$

동작주파수 대역에서 보조코일의 효과를 분석하기 위해서 위의 전압방정식에 $s = j\omega_o$ 를 대입하여 정리하면 다음과 같이 식이 정리된다.

$$V_p(j\omega_o) = j\omega_o k_{ps} L_p (1 + \alpha k_{pt}^2) I_p(j\omega_o) + j\omega_o M_{ps} (1 + \alpha k_{pt} k_{st}) I_s(j\omega_o),$$

$$V_s(j\omega_o) = j\omega_o M_{ps} (1 + \alpha k_{pt} k_{st}) I_p(j\omega_o) + j\omega_o k_{ps} L_s (1 + \alpha k_{st}^2) I_s(j\omega_o).$$

여기서, α 는 다음과 같이 정의된다.

$$\alpha = \frac{\omega_o^2}{k_{ps}(\omega_o^2 - \omega_t^2)}.$$

보조권선의 효과를 확인하기 위해서 다음과 같이 변수를 정의한다.

$$k_{ps}^t = \frac{1 + \alpha k_{pt} k_{st}}{\sqrt{(1 + \alpha k_{pt}^2)(1 + \alpha k_{st}^2)}},$$

$$L_p^t = \frac{k_{ps} L_p (1 + \alpha k_{pt}^2)}{k_{ps}^t},$$

$$L_s^t = \frac{k_{ps} L_s (1 + \alpha k_{st}^2)}{k_{ps}^t},$$

$$M_{ps}^t = (1 + \alpha k_{pt} k_{st}) M_{ps}.$$

그러면, 동작주파수 부근에서 전압방정식은 다음과 같이 보조코일의 효과를 포함한 2중 코일 시스템으로 나타낼 수 있다.

$$V_p(j\omega_o) = j\omega_o k_{ps}^t L_p^t I_p(j\omega_o) + j\omega_o M_{ps}^t I_s(j\omega_o),$$

$$V_s(j\omega_o) = j\omega_o M_{ps}^t I_p(j\omega_o) + j\omega_o k_{ps}^t L_s^t I_s(j\omega_o).$$

위의 식으로부터 보조권선의 추가에 따라 1차권선과 2차권선의 상호인덕턴스가 $\alpha k_{pt} k_{st} M_{ps}$ 만큼 증가하는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 동작주파수 대역에서 전압전달함수는 다음과 같이 정리된다.

$$G(j\omega_o) = \frac{\sqrt{L_s}}{\sqrt{L_p}} \frac{\sqrt{1 + \alpha k_{st}^2}}{\sqrt{1 + \alpha k_{pt}^2}}.$$

2.2 설계절차 및 설계예

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 300~400V |
| 출력용량 | 3.3kW |
| 동작주파수 | 80~90kHz |
| 자기결합도 | 0.25±10% |

동작주파수는 미국 자동차공학회(IEEE)를 중심으로 85kHz 내외의 주파수를 규격으로 제정하려는 움직임이 있다는 점을 고려하였다.

먼저, 보조권선으로 인한 공진주파수는 다음과 같이 동작주파수보다 높게 선정되어야 하는데 이는 그러한 조건에서만 등가인덕턴스의 상승효과가 발생하기 때문이다.

$$f_t = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_t C_t}} > 90.00kHz$$

다음으로, ω_o 를 동작주파수로 정하고 해당 주파수에서 전압전달비를 설계한다. 예를 들면 다음과 같은 식을 활용할 수 있다.

$$\frac{V_o(j\omega_o)}{V_i(j\omega_o)} = \frac{\sqrt{L_s}}{\sqrt{L_p}} \frac{\sqrt{1 + \alpha k_{st}^2}}{\sqrt{1 + \alpha k_{pt}^2}} \approx \frac{V_o}{V_i} = 1$$

ω_r 에서는 공진에 의해 전압 전달비가 매우 커지기 때문에 ω_r 이 동작주파수 범위내에 있지 않도록 설계해야 한다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} < 81.38kHz$$

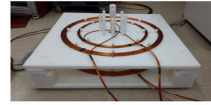
또한, 결합계수가 변동하더라도 출력전압의 크기를 유지할 수 있도록 하기 위해 다음과 같은 조건을 고려할 수 있다.

$$f_{o,\min} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(1 - k_{\min})L_p C_p}} \geq 81.38kHz$$

$$f_{o,\max} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(1 - k_{\max})L_p C_p}} \leq 90.00kHz$$

이상의 과정으로 상기 사양의 무선전력전송회로를 설계하고 공진탱크를 제작한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

| Parameters | Designed | Measured |
|------------|----------|----------|
| L_p | 95μH | 96.65μH |
| L_s | 149μH | 152.83μH |
| L_t | 25μH | 25.42μH |
| C_p | 47nF | 45.85nF |
| C_s | 30nF | 29.50nF |
| C_t | 100nF | 101.55nF |
| M_{ps} | 273.6μH | 284.2μH |
| M_{pt} | 160.0μH | 160.1μH |
| M_{st} | 103.8μH | 102.9μH |



| Coefficient | Air-gap: 150mm | Air-gap: 175mm | Air-gap: 200mm |
|-------------|----------------|----------------|----------------|
| k_{ps} | 0.27 | 0.23 | 0.21 |
| k_{pt} | 0.32 | 0.32 | 0.32 |
| k_{st} | 0.18 | 0.17 | 0.15 |

그림 2 무선전력전송회로 설계 및 제작 결과
Fig. 2 Design result for the three-coil circuit

3. 결론

본 논문에서는 권선 사이의 자계결합도 변동을 고려한 보조권선을 포함하는 무선전력전송회로의 설계기법을 제시하였다. 전기 자동차 무선충전회로는 동작주파수가 규격에 의해서 일정범위로 제한되고 1차측과 2차측 권선의 정렬상태에 따라서 자계결합도가 변동할 수 있다는 특징이 있기 때문에, 본 논문에서 제시한 설계기법을 통해 출력단의 전압을 적절하게 유지시키는 기법이 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

이 논문은 한국생산기술연구원 기관고유사업(PER16190)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [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.