

직렬-직렬 보상 구조에서의 비통신 양방향 무선전력전송을 위한 2차단 전류 위상 추정 및 제어

성민재, 박재용, 최현규, 하정익
서울대학교

Secondary Current Phase Sensing and Control for Non-communication Bidirectional Wireless Power Transfer with Series-Series compensation

MinJea Sung, Jae Yong Park, Hyeon-gyu Choi, Jung-ik Ha
Department of Electrical Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

ABSTRACT

본 논문에서는 직렬-직렬(SS) 보상 구조를 가지는 양방향 무선전력전송 시스템의 비통신 전력전송 제어 방법에 대해 소개한다. 또한 2차단에서의 전력 전달 제어에 1차단의 위상의 필요함을 보이며, 이를 도출하기 위한 20kHz 전류 센싱 방법에 대해서 다룬다. 시뮬레이션과 실험 파형을 통해 소개한 제어 변수와 고주파수 전류 신호 센싱의 방법의 타당성을 증명하였다.

1. 서론

직렬-직렬 보상 구조를 포함한 무선전력전송 토폴로지는 양단에 H-bridge를 사용함으로써 출력의 위상 차이를 만들 수 있고, 전력 전달 방향을 결정할 수 있다. 때문에 양방향 전력 전달이 가능하여 전기차, 로프리스 엘리베이터 등 여러 분야에 응용이 가능하다.[1]

위와 같은 양방향 무선전력전송 제어 방식은 양 단 H-bridge의 위상 정보를 필요로 한다. 기존의 제어 방법 들은 하나의 DSP로 양 단의 H-bridge를 제어하거나, 두 개의 DSP간 통신을 통해 전력 제어를 한다. 때문에 무선전력전송 방식임에도 불구하고 물리적 연결 범위 혹은 통신 범위에 따른 제약이 생긴다. 하지만 본 논문은 통신 없이 양단의 위상을 추정해 H-bridge를 각각 제어하는 방식을 제안한다. 제안하는 비통신 전력 전달 제어 방식을 통해서, 주 전원을 공급하는 1차단에 대해 2차단은 독립적으로 제어되기 때문에 부하로써 움직임 등에 더 큰 자유도를 가질 수 있다.

2. 본론

2.1 시스템 구성

그림 1은 본 논문이 다루는 비통신 양방향 무선전력전송 시스템의 구조이다. 각 H-bridge의 스위칭 주파수는 20kHz이며, 구형파의 출력 전압 V_{pri} 와 V_{sec} 를 만든다. 본 논문에서는 1차측 H-bridge 제어를 통해 i_{pri} 를 일정한 크기와 위상을 가지는 일정 전류원으로 만든다. 이때의 전류는 공진 탱크의 필터링에 의해 정현파 전류로 가정할 수 있다.

2차측의 듀티와 위상 제어를 통해서 1차단의 일정 전류원으로부터 전달 전력의 크기와 방향을 제어한다. 여기서 전력은 유효전력과 무효전력 모두를 의미한다.

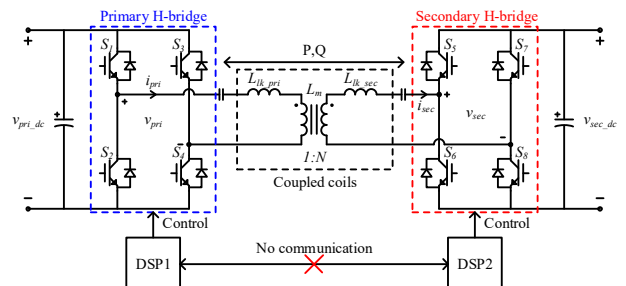


그림 1 직렬-직렬 보상 양방향 무선전력전송 토폴로지
Fig. 1 Bidirectional wireless power transfer topology with SS compensation

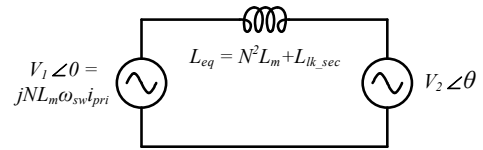


그림 2 결합 코일 등가화 모델
Fig. 2 Equivalent model of coupled coils

$$P_2 = -\frac{V_1 V_2 \sin \theta}{2L_{eq} \omega_{sw}} = -\frac{NL_m \omega_{sw} i_{pri} V_2 \sin \theta}{2L_{eq} \omega_{sw}}$$

$$Q_2 = -\frac{V_2^2 - V_1 V_2 \cos \theta}{2L_{eq} \omega_{sw}} = -\frac{V_2^2 - NL_m \omega_{sw} i_{pri} V_2 \cos \theta}{2L_{eq} \omega_{sw}} \quad (1)$$

2.2 일정 전류원으로부터의 전력 계산

1차단은 일정한 전류를 공급해주기 때문에 2차단에서는 이로부터의 전달 전력을 계산할 수 있다. 1차단이 일정한 전류원으로 제어될 때 그림 1에서의 결합 코일은 그림 2와 같이 등가화 될 수 있다. 이 모델로부터 1차단에서 2차 단으로 전달되는 전력은 식 (1)로 얻을 수 있다. θ 는 V_1 과 V_2 의 위상 차이이며, V_1 은 일정 전류원에 의해서 결정되기 때문에, P_2 와 Q_2 의 제어를 위해서는 V_2 와 θ 를 제어 변수로 사용할 수 있다.

2.3 2차단 코일 전류 센싱

2.3.1 고주파 전류 센싱

(1)로부터 2차측 전력 제어를 위해서는 1차단과의 위상차 정보가 필요한데, 스위칭 주파수에 따라 i_{pri} 와 i_{sec} 는 20kHz의 주기를 가진다. 하지만 20kHz의 신호를 실시간으로 센싱 하는 것은 매우 어렵기 때문에 적은 샘플링으로 전류의 크기와 위상을 얻는 과정이 필요하다.

$$i_x = A \sin \theta_x$$

$$i_{x+1} = A \sin(\theta_x + \pi/2) = A \cos \theta_x \quad (2)$$

$$A = \sqrt{i_x^2 + i_{x+1}^2}, \quad \theta_x = \tan^{-1}(i_x/i_{x+1})$$

그림 3 80kHz 전류 샘플링
Fig. 3 80kHz current sampling

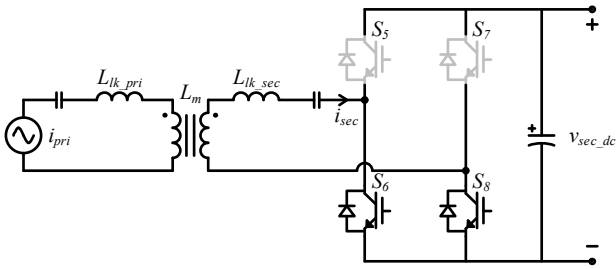


그림 4 무부하 상태 2차단 전류 센싱
Fig. 4 Secondary current sensing in no load condition

전류가 정현파라는 가정하에, 한 주기 내 $\pi/2$ 간격으로 2번의 샘플링으로 전류의 크기와 위상을 복원할 수 있다. 복원식은 (2)와 같다.

하지만 실제의 전류는 고조파 왜곡이 포함되어 있기 때문에 그림 3과 같이 한 주기 동안 4번의 샘플링을 통해서 총 4개의 크기와 위상 정보를 얻는다. 평균을 통해서 보다 정확한 파라미터를 얻을 수 있다.

2.3.2 무부하 2차단 코일 전류 센싱

본 논문의 시스템은 결합 코일에 E자 페라이트 코어를 사용하였다. 때문에 코일간의 결합 계수가 커서 1차단과 2차단에는 동일한 위상의 전류가 흐른다.

그림 4와 같이 1차단을 일정 전류원으로 보고 S₆와 S₈를 도통시켜 무부하 상태로 2차단 코일에 전류가 흐르도록 한다. 이 때의 2차단 전류 센싱을 통해 크기와 위상 정보를 얻을 수 있는데, 이 위상은 1차단 전류의 위상과 동일하여 θ 를 얻을 수 있다.

2.3.3 2차단 초기 위상 제어

만약 1차단의 위상을 알지 못한 상태로 2차단 전력 제어를 시작한다면, 본 논문의 구조는 1차단과 2차단의 위상차이가 전력 전달 방향을 결정하기 때문에, 임의의 1차단의 위상과 2차단의 위상 차이 및 부호로는 통신 없이 제어가 불가능하다.

따라서 2차단에서의 전력 제어 이전에 2차단 대한 1차단 전류의 위상을 도출해야 한다. 2.3.2의 방법으로 위상 정보를 얻을 수 있으며, 얻은 위상은 일정하게 제어되어야 한다. 초기 위상 제어에 맞춰서 2차단 H-bridge에서의 출력 타이밍을 정할 수 있으며, 전력 전달 방향과 무효 전력의 크기를 제어할 수 있다.

2.4 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 5는 복원된 2차단 전류의 크기와 위상, 그리고 도출한 위상을 0으로 제어하는 파형이다. 5-(a)의 파형

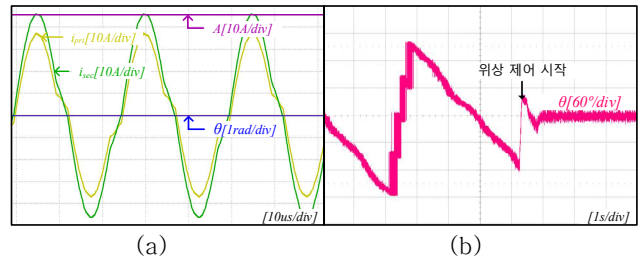


그림 5 2차단 전류 크기 및 위상 복원 초기 위상 제어
Fig. 5 Reconstruction of secondary current mag and phase & Initial phase control

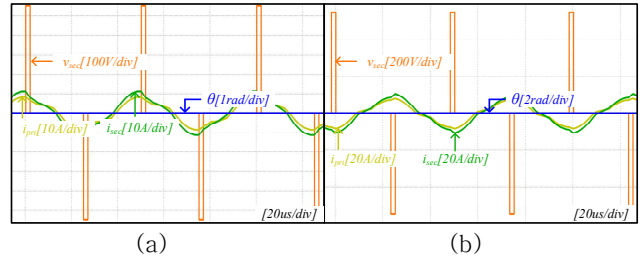


그림 6 2차단 전압 출력 제어
Fig. 6 Secondary voltage output control

을 보면, 1차단과 위상이 동일한 2차단 전류의 크기와 위상을 도출한 것을 볼 수 있다. 이 때의 위상 차이는 0으로 제어되고 있다. 5-(b)를 보면, 실제 실험 파형으로, 1차단과 2차단 모두 20kHz의 전류가 흐르고 있지만 실제 도출하고 있는 위상 차이는 계속 틀어지고 있는 것을 볼 수 있다. 때문에 2차단은 얻은 위상을 일정하게 제어할 필요가 있다. 위상 제어가 시작되면 0으로 제어되는 것을 볼 수 있다.

그림 6은 도출한 위상을 바탕으로 2차단 출력 전압을 제어하는 파형이다. 파형 6-(a)를 보면 2차단 출력 전압의 위상을 2차단 전류와 위상차이가 0이 되게 제어함으로써 유효 전력만 전달하는 것을 볼 수 있다. 파형 6-(b)를 보면, 2차단 출력 전압의 위상이 2차단 전류와 반대가 되게 제어함으로써 전력을 1차단 방향으로 전달할 수 있다. 두 파형 모두 전달 무효전력은 0으로 제어되고 있다. 만약 2차단 출력 전압과 전류의 위상 차이를 만든다면 무효전력을 전달할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 직렬-직렬 보상 구조를 가지는 비통신 무선전력전송 시스템의 제어를 위해 위상 정보가 필요함을 보였으며, 이를 얻기 위한 20kHz 전류 신호의 센싱에 대해 다뤘다. 시뮬레이션과 실험 파형을 통해서 20kHz의 전류의 크기와 위상을 도출하는 것을 보였다. 또한 도출한 파라미터를 이용한 전달 전력 제어의 시뮬레이션 파형을 제시하였다. 이러한 파형들을 통해 본 논문에서 제시한 제어 변수와 도출 방법에 대한 타당성을 증명하였다.

본 연구는 서울대학교 전력연구소의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참고 문헌

- [1] U. K. Madawala and D. J. Thrimawithana, "A Bidirectional Inductive Power Interface for Electric Vehicles in V2G Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 10, pp. 4789-4796, Oct. 2011.