

무선전력전송시스템의 수신단 컨버터를 위한 최대출력점 추적 제어알고리즘

곽진영, 이정인, 안혜은, 김석은, 김태웅
경상국립대학교

Maximum Power Point Tracking Control Algorithm for Receiver Side Converter of Wireless Power Transfer System

Jin-Yeong Kwak, Jung-In Lee, Hye-Eun An, Seok-Eun Kim, Tae-Woong Kim
Gyeongsang National University

ABSTRACT

본 논문은 LCC-LCC 토폴로지가 적용된 무선전력전송 시스템의 수신단에 컨버터를 적용하여 전력밀도, 최대출력, 효율을 향상시킬 수 있는 제어기법을 고찰한 후, 수신단 컨버터의 제어에 초점을 맞추어 입력전압의 위상정보검출과 관계없이 삼각파신호의 위상을 가변할 수 있는 최대출력점 추적제어알고리즘을 제안하고, 수신단 컨버터의 입력전압과 삼각파신호와의 위상차에 따른 출력 관계도, 듀티비와 출력 관계도가 있음을 수식적으로 표현하였으며 PSIM 시뮬레이션 해석을 통해 도출된 수식과 제안 제어알고리즘의 타당성을 검증한다.

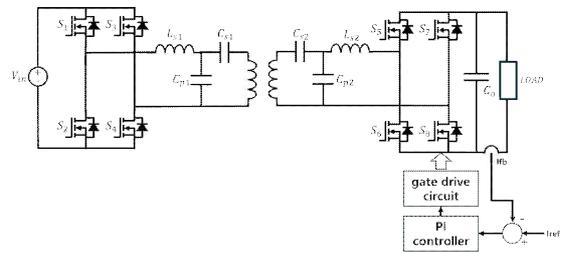
1. 서론

최근 환경문제에 따라 기존 내연기관 자동차(ICE, internal combustion engine)를 전기자동차로 대체하기 위해 전기자동차(EV, electric vehicle)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그에 따라 전기자동차 무선충전에 대한 필요성 또한 강조되고 있다. 현재 전기자동차 무선충전에 대한 표준과 여러 토폴로지 등이 제안되고 있지만 무선충전의 특성상 높은 고주파 교류를 사용하며 유선상으로 송수신단이 분리되어 있다는 점으로 수신단의 정류회로에 턴온/턴오프 제어가능한 스위칭소자를 사용하는 것에 어려움이 존재한다. 컨버터의 높은 고주파 입력위상정보를 검출하는 것은 사실상 불가능하다. 이는 제어시스템의 검출시간 및 제어주기가 제한적이기 때문에 제어관점에서는 검출뿐만 아니라 제어 적용시에는 시스템이 불안정하게 되는 요인이 될 수 있다.

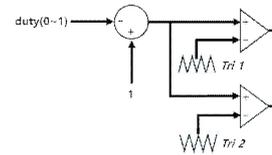
상기 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 컨버터의 입력 전원 위상정보를 검출하지 않고, 대신에 컨버터의 출력 직류전압 혹은 직류전류에 대한 정보만으로 언제나 시스템이 최대출력을 얻을 수 있도록 하는 최대출력동작점 추종알고리즘을 제안하고, 이에 대한 유효성을 시뮬레이션 해석을 통해 검증한다.

2. PWM 컨버터 기반 WPT 시스템의 출력

그림 1의 (a)의 출력전류 I_{load} 는 식 (1)을 포함한 식 (2)에 의해 결정되지만 이는 수신단 컨버터의 반송파(Tri 1 및 2) 위상이 그림 2에서 보여준 위상관계(송신단 인버터의 출력전압 V_{AB} 와 수신단 컨버터의 입력전압 V_{ab} 의 위상차가 90도)에서 최대출력이 가능하고 출력전류는 위상오차 θ_{err} 에 따른 코사인



(a) Equivalent circuit of LCC-LCC topology for WPT



(b) Pulse Generator

Fig. 1 Equivalent circuit and Pulse Generator

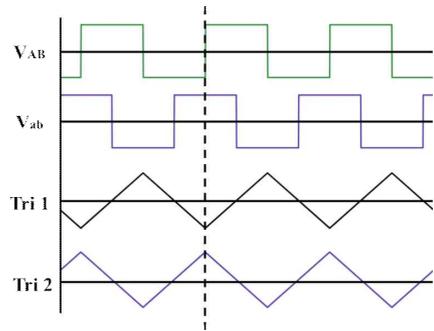


Fig.2 Operational waveforms of PWM converter

함수 관계를 지니고 있어 식 (2)는 식 (3)으로 다시 표현이 가능하다. 즉, 위상오차 θ_{err} 에 따라 컨버터 출력은 송신단 전력을 부하측에 전달하기 위해서는 컨버터의 출력전압 혹은 출력전류를 기반으로 정확한 위상차 90도를 추정하여 위상오차 θ_{err} 를 최소화되도록 제어해야 필요가 있으며, 위상오차가 ± 90 도 이내인 경우에는 제어가능하지만, 그 이상인 경우에는 출력제어 불가능한 범위에 속한다. 그리고 그림 2에는 컨버터의 레그 1 및 레그 2에 대한 반송파 신호파형 (Tri 1 및 Tri 2, 상호 180도 관계 유지)을 보여주며, 본 논문에서는 위상오차를 최소화하기 위해 반송파 위상을 가변하여 컨버터의 최대출력 전달이 가능하도록 제어한다.

$$I_{Ls2} = V_{in} \omega^3 M C_{p1} C_{p2} \quad (1)$$

$$I_{load} = \frac{8}{\pi^2} I_{Ls2} \quad (2)$$

$$I_{load} = \begin{cases} \frac{8}{\pi^2} I_{Ls2} \cos \theta_{err} & -90 < \theta_{err} < 90 \\ 0 & 90 \leq \theta_{err} \leq 270 \end{cases} \quad (3)$$

3. 최대출력점 추적제어알고리즘

턴온/턴오프 가능한 스위칭소자를 사용한 정류회로에 있어서 최대출력이 식 (3)에 의존하기 때문에 위상오차 θ_{err} 의 최소화 요구되며 이에 컨버터의 입력전압 위상정보가 필요하다.

컨버터의 입력전원 위상을 추정하는 기법에는 직접적으로 입력전압을 검출하여 제로크로싱 방식에 의해 위상정보를 추정하는 방식과 검출된 입력전압을 PLL 알고리즘을 통해 위상정보를 추정하는 방식이 있지만, 서론에서 기술하였듯이 WPT 시스템에 적용하기에는 무리가 있다. WPT 시스템의 수신단 컨버터제어에 있어서 입력전압 위상정보는 출력전압 V_{load} 혹은 출력전류 I_{load} 가 최대가 되도록 컨버터의 반송과 위상을 가변시켜 위상정보 θ_{est} 를 식 (4)와 같이 추정하여 위상오차를 최소화 가능하도록 하였다.

$$\theta_{est} = \theta_{cmp} + \theta_{default} \quad (4)$$

여기서, $\theta_{default}$ 는 임의 초기위상

그림 3은 본 논문에서 제안한 위상추정 제어알고리즘의 순서도를 보여준다. 일례로 출력전압정보 V_{load} 를 검출하여 지령전압 V_{load}^* 과 비교하여 출력전압이 지령전압에 추종할 때까지 반송과 위상을 가변시켜 컨버터의 입력전압 위상정보를 추정한다. 출력전압이 지령전압의 정상상태 오차범위에 들어온다면 반송과 위상을 고정시켜 제어한다.

제안 제어알고리즘은 단지 출력 직류전압 혹은 직류전류에 대한 정보만으로도 위상오차 θ_{err} 를 최소화 가능하고, 제로크로싱 기법 혹은 PLL 기법과 같은 위상검출기법이 필요없으며, 항상 컨버터의 최대출력 가능하도록 입력전압 위상정보를 추정할 수 있어 부하측에 최대출력을 전달 가능하다.

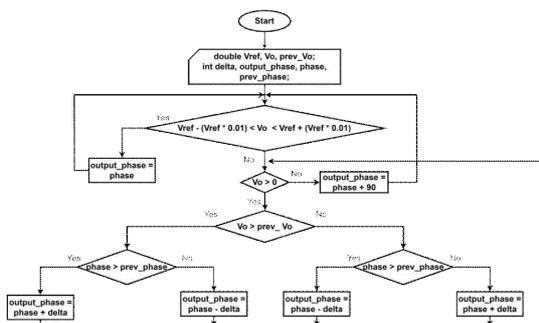


Fig.3 Phase Tracking Algorithm Flowchart

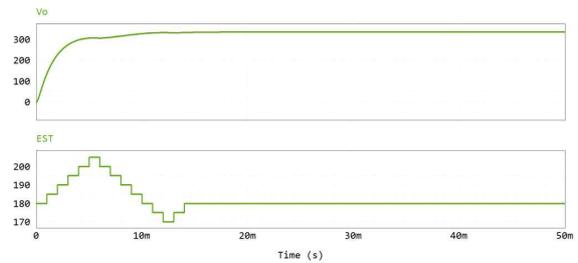
4. 시뮬레이션 해석

본 논문에서는 제안 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해 PSIM 시뮬레이션 해석을 진행하였고, 이에 대한 시뮬레이션 시스템 사양은 표 1에 보여준다.

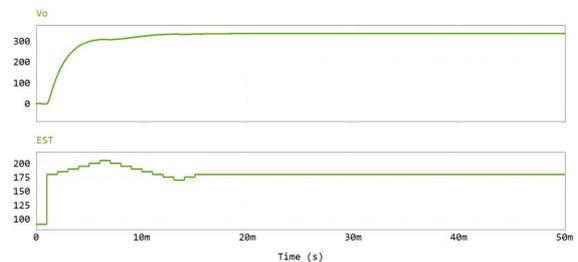
그림 1에 보여준 제안 제어알고리즘을 적용한 회로 구성에 있어서 초기위상오차 θ_{err} 를 각각 90도 혹은 270도로 설정하여

Table 1. Simulation specification of LCC-LCC based WPT system

parameter	value	parameter	value
Vin	300V	fsw	85kHz
L1	284.7uH	L2	274.5uH
Ls1	29uH	Ls2	44uH
Cs1	14nF	Cs2	15nF
Cp1	120nF	Cp2	80nF
k	0.1	Rload	34Ω
delta	5deg		



(a) $\theta_{default} = 90deg$



(b) $\theta_{default} = 270deg$

Fig.4 Output voltage V_o and estimated phase EST by proposed algorithm according to initial default phase (phase error)

도 제안 알고리즘에 의해 위상오차가 최소화되도록 반송과 위상을 가변시켜 최대출력을 얻게 됨을 그림 4에 의해 확인할 수 있다. 위상오차 θ_{err} 가 90도 혹은 270도의 초기상태에서는 식 (3)에 의해 출력이 0이 되어야 하지만, 제안 알고리즘에 의해 출력전압이 지령전압을 추종하기 위해 제어주기마다 반송과 위상을 delta 위상만큼 가변시켜 최종적으로 출력직류전압이 지령 직류전압에 추종하였을 때 그 위상을 고정하여 지속적으로 제어한다.

5. 결론

본 논문에서는 수신단에 PWM 컨버터를 적용한 LCC-LCC 기반 WPT 시스템을 수신단 컨버터의 위상오차에 따른 출력관계를 고찰하여 수식관계를 도출하였고, 제안 알고리즘을 적용하였을 때 초기위상오차에 관계없이 출력 직류전압 혹은 출력 전류전류에 대한 검출정보만으로 반송과 위상 가변제어에 의해 컨버터의 위상정보를 추정하고 위상오차를 최소화시켜 최대출력제어가 가능함을 PSIM 시뮬레이션 해석에 의해 검증하였고, 현재 프로토타입을 제작 중에 있으며 실험을 통해 이에 대한 유효성을 검증할 예정이다.

참고 문헌

[1] Jin-Yeong Kwak, Jung-In Lee, Hye-Eun An, Seok-Eun Kim, and Tae-Woong Kim (2024-07-01). Control Scheme of Secondary Side PWM Converter for LCC-LCC Based Wireless Power Transfer System. Power Electronics Conference, Jeju