

ZCS 특성을 고려한 IPT 시스템 동작 주파수 제어 알고리즘

노태원, 이일의, 변중은, 김민국, 이병국[†]
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Operating Frequency Control Algorithm for IPT System considering ZCS Characteristics

Tae Won Noh, Il Ui Lee, Jong Eun Byeon, Min Kook Kim, and Byoung Kuk Lee[†]
 Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차 충전용 자기유도방식 무선전력전송 (IPT) 시스템에서 zero current switching (ZCS) 동작으로 인한 스위치 손상을 방지하는 제어 알고리즘을 제안한다. 알고리즘을 제안하기 위해 IPT 시스템에서 공진전류 위상 변화를 일으키는 bifurcation 현상과 금속성 이물질의 영향에 대해 분석하고, 분석 결과를 고려하여 동작 주파수 제어 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 시스템을 zero voltage switching (ZVS) 영역에서 동작하게 하고 일정한 출력 전압을 얻도록 제어한다. 제안한 알고리즘의 타당성을 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

일반적으로 IPT 시스템은 고효율 달성을 위하여 zero phase angle (ZPA) 주파수에서 동작한다. 하지만 결합계수 및 부하 변화에 따라 ZPA 주파수가 변하게 되면 시스템의 ZCS 영역 동작으로 인한 역병렬 다이오드의 큰 역회복 전류에 의해 시스템이 손상될 수 있다. 따라서 시스템은 통상 ZVS 영역에서 동작시킨다. 이 때, bifurcation 현상이 발생하거나 외부에서 금속성 이물질이 투입되면 위상변화가 발생하여 ZCS 동작 할 수 있다^[1]. 따라서 시스템의 특성을 고려하여 위상변화로 인한 ZCS 동작을 방지할 수 있는 제어가 필요하다.

본 논문에서는 SP 토폴로지 시스템을 이용한 IPT 시스템에서 ZCS를 발생시킬 수 있는 원인을 파악하고, 그에 따른 공진전류의 위상 정보를 분석한다. 이를 기반으로 ZCS 영역을 빠르게 벗어나 ZVS 동작 및 정전압 출력을 하도록 하는 동작 주파수 제어 알고리즘을 제안하고, 이를 PSIM 시뮬레이션을 이용하여 검증한다.

2. IPT 시스템에서 위상변화 원인

2.1 시스템 구성

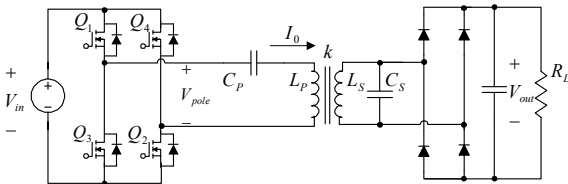


그림 1 IPT 시스템 회로도
 Fig. 1 Circuit diagram of IPT system.

표 1 시뮬레이션 사양

Table. 1 Simulation specifications.

Parameter	Value	Parameter	Value
V_{in}	380 [V]	C_p	3 79 [nF]
V_{out}	250 [V]	L_p	893 [uH]
f_o	85 [kHz]	C_s	239 [nF]
f_{sw}	90 5 [kHz]	L_s	15 394 [uH]
R_L	100~400[Ω]	k	0 19

그림 1은 위상변화의 원인인 bifurcation과 금속성 이물질로 인한 시스템의 ZCS 특성을 확인하기 위한 회로도를 나타내며, 이때 시스템의 사양은 표 1과 같다.

2.2 Bifurcation

Bifurcation은 시스템 구성 파라미터가 임계점 이상의 값으로 변화하는 순간, 위상 및 전압 이득 등 시스템의 특성이 변화하는 현상을 말한다^[1]. IPT 시스템에서 송·수신패드의 결합계수가 임계 결합계수보다 커지게 되면, ZPA 주파수가 2개 이상으로 증가하고 전압이득 곡선이 2개 이상의 극점을 가지게 된다. 특히 EV 충전용 IPT 시스템은 EV 배터리가 충전되면 배터리 내부 저항이 증가 하고, 이로 인해 시스템의 특성이 바뀌면서 임계 결합계수가 감소하여 bifurcation이 발생할 수 있다. 그림 2는 부하 저항에 따른 SP 토폴로지 시스템의 임피던스 위상 변화를 나타낸다. 시스템의 부하저항이 특정값 (R_2) 이상으로 커지면 bifurcation이 발생하여 위상이 반전된다. 위상이 반전되면 시스템이 ZCS 동작하게 되어 역회복 전류로 인한 시스템 손상을 초래할 수 있다.

2.3 금속성 이물질

송·수신패드 사이에 투자율이 큰 금속성 이물질이 투입되면, 송신측 코일에서 생성하는 자기장에 의하여 이물질이 자화된다. 자화된 이물질은 자기장의 변화를 방해하는 방향으로 역기전력을

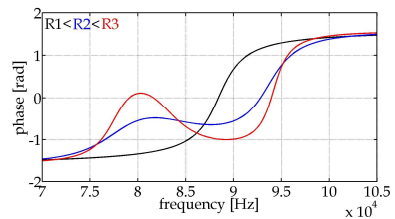


그림 2 부하저항 가변에 따른 임피던스 위상
 Fig. 2 Phase of Impedance according to the load resistance variation.

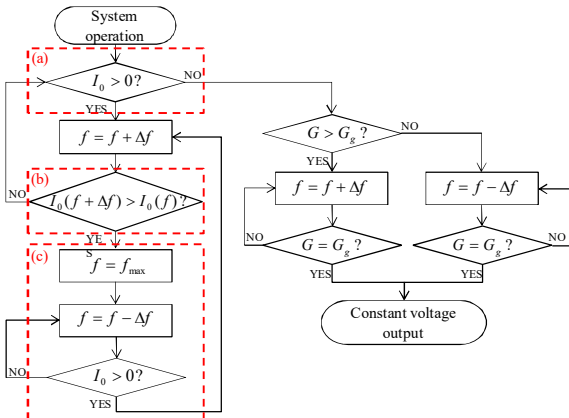


그림 3 제안하는 알고리즘 순서도
Fig. 3 Flowchart for proposed algorithm.

발생시킨다. 발생한 역기전력이 이물질에 와전류를 만들면, 생성된 자속과 송신 패드 내 1차 코일의 자속 일부가 상쇄되어 1차 측 자기인덕턴스가 감소한다. 이로 인해 회로의 공진주파수는 증가하게 되고, 시스템의 동작 영역이 달라진다.

3. 제안하는 주파수 제어 알고리즘

그림 3은 시스템의 ZCS 특성을 고려하여 제안한 알고리즘이며 총 a, b, c 3단계로 구분하였다.

a. ZCS 동작 여부 확인

시스템의 동작 상태를 파악하기 위해 송신 측의 공진 전류 (I_o)를 센싱하여 ZCS 동작여부를 확인한다. 센싱 시점은 그림 4에 표시한 지점으로, I_o 가 양의 값을 가지면 시스템이 ZCS 동작을 하며, 음의 값을 가지는 경우 ZVS 동작함을 알 수 있다.

b. 현재 동작 주파수 영역 파악

스위칭 주파수를 증가시킬 때 전류와 전압 간 위상차 변화에 따라 동작주파수 영역을 그림 5과 같이 구분한다. 영역 1은 주파수를 증가시켰을 때 위상차가 증가하는 주파수 영역으로, 공진 주파수 (f_0)와 극점주파수 (f_1) 사이에 해당한다. 영역 2는 주파수가 증가하면 위상차가 감소하는 영역으로, 극점주파수 (f_1)

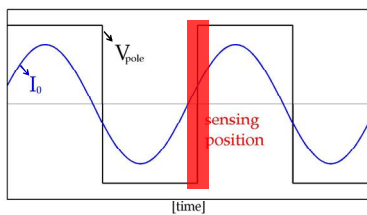


그림 4 전류 센싱 위치 개념도
Fig. 4 Conceptual diagram of current sensing position.

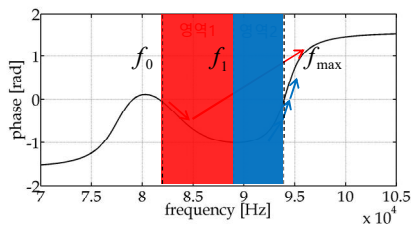


그림 5 ZVS 동작을 위한 스위칭 주파수 제어 방법
Fig. 5 Switching frequency control methods for ZVS operation.

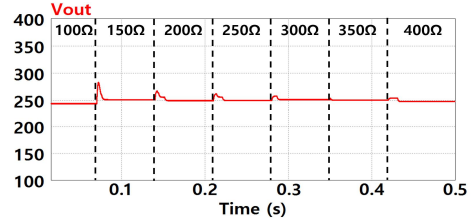


그림 6 부하저항 가변에 따른 정전압 출력 시뮬레이션 파형
Fig. 6 Simulation wave form of constant voltage output according to load resistance variation.

이후의 ZCS 동작 영역을 말한다. bifurcation이 발생 시 두 가지 경우가 모두 가능하며, 이물질이 투입될 경우에는 영역 2의 상황으로 간주 할 수 있다.

c. 동작 주파수 제어

영역 1에서는 주파수가 증가할수록 위상차가 커져 시스템이 손상될 위험이 커진다. 따라서 동작 주파수를 f_{max} 로 스위핑하여 모든 경우의 부하저항에서 ZVS 동작을 하도록 제한한다. f_{max} 는 EV 배터리가 완충되어 시스템이 최대 부하저항을 가질 때, ZVS 동작영역 내에서 목표 전압이득을 만족하는 주파수를 의미한다. 동작 주파수가 영역 2에 존재하는 경우, ZVS 동작을 할 때까지 점진적으로 주파수를 증가시킨다. 그 후 목표 전압이득 (G_g)과 현재 시스템의 전압이득 (G) 간 차에 비례하여 주파수의 증감분 (Δf)을 결정하여 제어한다.

4. 시뮬레이션 검증

시뮬레이션 검증을 위해 PSIM 시뮬레이션으로 그림 1과 같이 구성하였으며, 사양은 표 1과 같다. 제안한 알고리즘을 검증하기 위하여 부하 저항 100[Ω]부터 최대 부하 저항 400[Ω]까지 50[Ω]씩 늘려가며 출력 전압을 측정하였다. 그림 6은 시뮬레이션 결과 파형을 나타낸다. 실험 결과, 모든 부하 저항에서 목표 전압의 5% 이내의 오차를 보였으며 이를 통해 제안한 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

5. 결론

본 논문에서는 자기유도방식 무선전력전송 (IPT) 시스템에서 스위치의 ZCS 동작으로 인한 시스템 손상을 방지하는 동작 주파수 제어 알고리즘을 제안하였다. 시스템의 ZCS 특성을 확인하기 위해 bifurcation과 급속성 이물질의 영향에 대하여 분석했으며, 분석 결과를 통해 스위치가 일정한 출력전압과 ZVS 동작을 유지 할 수 있는 알고리즘을 구성하였다. 구성된 알고리즘을 검증하기 위해 PSIM 시뮬레이션을 사용하여 구현하였으며, 시스템이 부하 저항 가변에 따라 ZVS 동작 및 전압이득 제어 하는 것을 확인하였다.

이 논문은 (주)현대자동차의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

[1] Chwei Sen Wang, Covic, G.A and Stielau, O.H, "Power Transfer Capability and Bifurcation Phenomena of Loosely Coupled Inductive Power Transfer Systems", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 1, pp. 148 157, February, 2004