

# 계통연계형 인버터에서 직류단 전압 센서의 고장 허용 제어

김광섭\*, 이교범\*, 이동춘\*\*, 김장목\*\*\*  
 아주대학교\*, 영남대학교\*\*, 부산대학교\*\*\*

## Fault-Tolerant Control of a DC-link Voltage Sensor for Grid-Connected Inverter Systems

Gwang-Seob Kim\*, Kyo-Beum Lee\*, Dong-Choon Lee\*\*, and Jang-Mok Kim\*\*\*  
 Ajou University\*, Yeungnam University\*\*, Pusan National University\*\*\*

### ABSTRACT

최근 계통연계형 인버터 시스템에서 고 신뢰 운전이 매우 중요한 과제로 대두되고 있다. 특히 인버터의 고장에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 계통연계형 인버터에서 직류단 전압 센서의 고장 허용 제어 알고리즘을 제안한다. 직류단 전압의 추정값으로 고장의 발생 시에 허용 제어를 수행한다. 매우 빠른 동특성을 가진 제어기가 요구되는 제안된 알고리즘의 적용을 위해 데드비트 전류제어기를 사용한다. 시뮬레이션을 통해 제안된 알고리즘을 검증한다.

### 1. 서 론

최근 화석에너지의 고갈에 대한 대체에너지로 풍력 및 태양광 발전시스템이 각광을 받고 있다. 대체자원 중 태양광은 공해가 없고, 안전하며 풍부한 자원이다<sup>[1]</sup>. 현재 많은 계통연계 관련 제품들이 상용화된 상태에서 기존의 제품을 유지보수하고 신뢰성을 보장하기 위해 시스템을 구성하는 필수 소자들(스위치, 커패시터, 센서 등)의 고장 허용 제어는 필수적이다<sup>[2]</sup>. 그 중 직류단 전압 센서는 직류단 커패시터에 걸리는 전압값을 감지하는 중요한 소자이다. 본 논문에서는 직류단 전압 센서가 고장이 났을 시에 잘못된 측정값 대신 센서리스 제어기법으로 추정된 추정값으로 대체함으로써 고장 허용 제어를 하는 알고리즘을 제안한다. 이러한 알고리즘에는 매우 빠른 동특성을 가진 제어기가 요구되기 때문에 데드비트 제어를 사용한다.

제안된 알고리즘은 PSIM을 사용한 시뮬레이션과 계통연계형 인버터 시스템 실험세트를 이용한 실험을 통해 타당성을 검증한다.

### 2. 직류단 전압 센서의 고장 허용 제어

#### 2.1 데드비트 전류제어기

그림 1에서 이산시간 전압방정식을 세우면 식 (1)과 같다.

$$\begin{cases} v_d^*(n) = R \frac{i_d(n+1) + i_d(n)}{2} + L \frac{i_d(n+1) - i_d(n)}{T_s} \\ \quad - \omega L \frac{i_q(n+1) + i_q(n)}{2} + e_d(n) \\ v_q^*(n) = R \frac{i_q(n+1) + i_q(n)}{2} + L \frac{i_q(n+1) - i_q(n)}{T_s} \\ \quad + \omega L \frac{i_d(n+1) + i_d(n)}{2} + e_q(n) \end{cases} \quad (1)$$

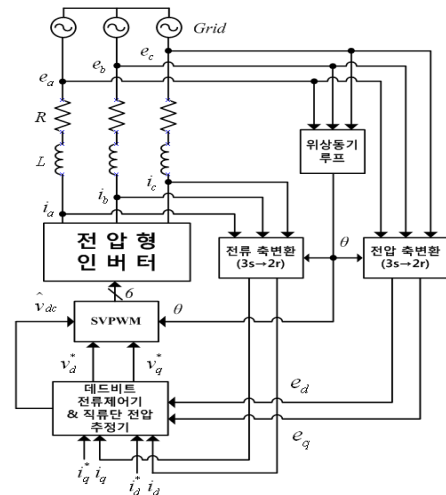


그림 1 계통연계형 인버터의 SVPWM 제어시스템  
 Fig. 1 The SVPWM control system of a grid-connected inverter

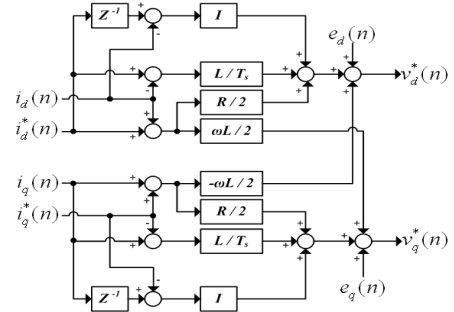


그림 2 데드비트 전류제어기의 블록도  
 Fig. 2 The block diagram of deadbeat current controller

식 (1)에서 데드비트 제어를 하기 위해 다음 상태 실제값을 현재 상태 지령값과 일치시키면 식 (2)와 같다.

$$\begin{cases} v_d^*(n) = R \frac{i_d^*(n) + i_d(n)}{2} + L \frac{i_d^*(n) - i_d(n)}{T_s} - \omega L \frac{i_q^*(n) + i_q(n)}{2} \\ \quad + e_d(n) \\ v_q^*(n) = R \frac{i_q^*(n) + i_q(n)}{2} + L \frac{i_q^*(n) - i_q(n)}{T_s} + \omega L \frac{i_d^*(n) + i_d(n)}{2} \\ \quad + e_q(n) \end{cases} \quad (2)$$

지령값을 더 정확하게 추종하기 위해 적분 제어기를 추가하여<sup>[3]</sup> 완성된 데드비트 전류제어기 블록도는 그림 2와 같다.

## 2.2 고장 허용 제어

직류단 전압 센서리스 제어 기법을 적용하기 위해  $\hat{v}_{dc}$ 와 비례적분 제어기  $F'(i_{dq}(n))$ 을 넣어서 식 (3)과 같은 비선형 방정식을 만들 수 있다<sup>[3]</sup>.

$$\begin{cases} \frac{\hat{v}_{dc}(n)}{v_{dc}(n)} v_d^*(n) = R \frac{i_d^*(n) + i_d(n)}{2} + L \frac{i_d^*(n) - i_d(n)}{T_s} \\ - \omega L \frac{i_q^*(n) + i_q(n)}{2} + e_d(n) + F(i_d(n)) + F'(i_d(n)) \\ \frac{\hat{v}_{dc}(n)}{v_{dc}(n)} v_q^*(n) = R \frac{i_q^*(n) + i_q(n)}{2} + L \frac{i_q^*(n) - i_q(n)}{T_s} \\ + \omega L \frac{i_d^*(n) + i_d(n)}{2} + e_q(n) + F(i_q(n)) + F'(i_q(n)) \end{cases} \quad (3)$$

적분 제어기를 추가한 데드비트 전류제어기 식을 식 (3)에 대입하여 간단히 하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{cases} \frac{v_{dc}(n) - \hat{v}_{dc}(n)}{v_{dc}(n)} v_d^*(n) = F'(i_d(n)) \\ \frac{v_{dc}(n) - \hat{v}_{dc}(n)}{v_{dc}(n)} v_q^*(n) = F'(i_q(n)) \end{cases} \quad (4)$$

q축을 유효성분으로 설정했기 때문에  $\hat{v}_{dc}$ 을 기준으로 q축 성분만 식을 정리하면 식 (5)와 같다.

$$\hat{v}_{dc}(n) = v_{dc}(n) - \frac{v_{dc}(n)}{v_q^*(n)} F'(i_q(n)) \quad (5)$$

이 식은 추정값이  $i_q(n)$ 에 대한 함수로 나타낼 수 있다는 것을 의미하며 비례적분 제어기 출력이 0이라면 추정값과 실제값이 같다는 것을 의미한다. 이런 관계에서 데드비트 제어를 적용하면 그림 3과 같이 제안된 직류단 전압 추정 비례적분 제어기와 식 (6)으로 정리된다.

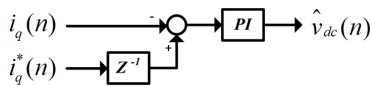


그림 3 제안된 직류단 전압 추정 비례적분 제어기

Fig. 3 The proposed PI controller of dc-link voltage estimation

$$\hat{v}_{dc}(n) = \hat{v}_{dc}(n-1) - (K_p + K_f T_s)(i_q^*(n-1) - i_q(n)) + K_p(i_q^*(n-2) - i_q(n-1)) \quad (6)$$

데드비트 제어기에 의해  $i_q(n) = i_q^*(n-1)$ 이 만족된다면,  $v_{dc}(n) = \hat{v}_{dc}(n)$ 과  $F'(i_q(n)) = 0$ 이 성립하여 제안된 비례적분 제어기는 직류단 전압을 정확하게 추정한다. 따라서 직류단 전압 센서가 없이 이 제안된 비례적분 제어기로 정확한  $v_{dc}$  정보를 제공하여 전체 시스템을 동작할 수 있다. 직류단 전압 센서가 고장이 났을 때 즉시  $v_{dc}$  값 대신에  $\hat{v}_{dc}$  값을 대입하여 계통연계형 인버터 시스템의 고장 허용 제어를 구현한다.

## 2.3 시뮬레이션 결과

제안된 알고리즘을 검증하기 위해 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션에 사용된 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

Table 1 The parameters of simulation

구분	파라미터	값
계통 상전압	$E_{max}$	311.127 [V]
계통 주파수	$f$	60 [Hz]
직류단 커패시턴스	$C_{dc}$	1100 [ $\mu$ F]
계통측 인덕턴스	$L$	4 [mH]
계통측 저항	$R$	0.5 [ $\Omega$ ]
샘플링 주기	$T_s$	100 [ $\mu$ s]
직류단 지령전압	$v_{dc}^*$	600 [V]

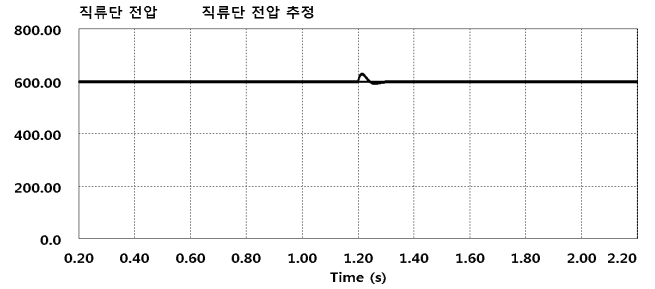


그림 4 직류단 전압센서의 고장 허용 제어

Fig. 4 The fault-tolerant control of dc-link voltage sensor

그림 4는 직류단 전압센서의 고장 허용 제어에 대한 시뮬레이션 파형이다. 1.2초에 전압센서가 고장난 후  $v_{dc}$ 에  $\hat{v}_{dc}$  값을 대입하여 고장 허용 제어를 구현하였다. 그 결과 직류단 지령전압 변화 등 시스템 변화에도 잘 추종하며 시스템을 안정적으로 운전할 수 있었다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 계통연계형 인버터에서 직류단 전압 센서의 고장 허용 제어 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통해 그 우수성을 입증하였다. 직류단 전압 센서리스 제어 기법을 응용하여 직류단 전압 센서가 고장이 나는 동시에 실제값 대신에 추정값으로 제어를 함으로써 전압 센서가 고장나더라도 운전이 가능한 고장 허용 제어를 구현하여 시스템이 정상적으로 작동됨을 확인하였다.

본 논문은 2011년도 한국에너지기술평가원(지식경제부)의 재원으로 전력산업연구개발사업 지원을 받아 수행되었음 (20091020300380-13-2-200).

## 참 고 문 헌

- [1] 이상혁, 정해광, 이교범, 최세완, 최우진, "PMSG를 이용한 풍력 발전 시스템의 3병렬 운전과 계통 연계 기술," *전력전자학회 논문지* 제15권, 제4호, pp. 296 - 308, 2010. 8.
- [2] Young-Jong Ko and Kyo-Beum Lee, "Fault Diagnosis of a Voltage-Fed PWM Inverter for a Three-Parallel Power Conversion System in a Wind Turbine," *Journal of Power Electronics*, vol. 10, no. 6, pp. 686 - 693, Nov. 2010.
- [3] Z. Wang and L. Chang, "A DC voltage monitoring and control method for three-phase grid-connected wind turbine inverters," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 23, no. 3, pp. 1118 - 1125, May. 2008.