

3상 AC/DC PWM 컨버터의 직류링크 전압센서 고장 진단 및 허용 제어

김수철*, 이동춘*, 김장목**, 이교범***
 영남대학교*, 부산대학교**, 아주대학교***

Fault Diagnosis and Tolerant Control of DC-Link Voltage Sensor in Three-Phase AC/DC PWM Converters

Soo-Cheol Kim*, Dong-Choon Lee*, Jang-Mok Kim**, Kyo-Beum Lee**
 Yeungnam University*, Pusan National University**, Ajou University***

ABSTRACT

본 논문은 루엔버거 관측기를 이용하여 직류링크 전압을 추정하고 추정치와 측정치를 비교하여 전압센서의 고장을 진단하는 방법을 제안한다. 또한 전압센서 고장 시에 추정치를 이용하여 제어함으로써 전압센서 고장 허용제어가 가능함을 보인다. 제안된 알고리즘은 시뮬레이션을 통해 그 타당성이 검증된다.

1. 서 론

최근 3상 AC/DC PWM 컨버터가 교류전원으로부터 직류 출력을 얻거나 신재생에너지의 발전 전원을 전력계통에 연계하기 위하여 폭넓게 사용되고 있다.^[1]

일반적으로 전압형 PWM 컨버터는 외부 전압제어 루프와 내부 전류제어 루프로 구성된다. 역률을 제어하기 위해 계통 측 전압 검출, 전류제어를 위해 계통 측 전류 검출이 필요하며, 출력 전압제어를 위해 직류링크 전압검출도 필요하다. 만약 출력 전압제어를 위한 직류링크 전압센서에 고장이 발생하면 직류링크 전압은 위험한 수준의 크기로 증가할 수 있으며 이는 전체 시스템과 스위칭 소자에 심각한 손상을 초래할 수 있다.^[2] 한편 소자 보호를 위해 시스템의 가동 중단은 경제적 손실을 초래할 수 있다. 따라서 계통 연계형 시스템의 유지 보수 및 운전 신뢰성을 확보하기 위해 센서고장 진단 및 허용제어가 바람직하다.

센서고장 시 검출 값을 추정하여 제어하는 방법은 여러 분야에 걸쳐 제안되고 있다. 그 중 직류링크 전압 추정 및 센서 고장 허용제어를 살펴보면, 데드비트제어를 이용하여 전류오차를 통해 직류링크 전압추정 및 직류링크 전압센서 고장 판별, 직류링크 전압센서리스 제어가 연구된 바 있다.^[2] 또한 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 직류링크 전압추정이 연구된 바 있다. 하지만 슬라이딩 모드 관측기는 비선형 모델을 이용하므로 복잡한 제어 알고리즘으로 구성된다.^[3]

이에 본 논문에서는 전력평형모델을 이용하여 상태관측기를 구성하고 전력 모델의 비선형성을 소신호 분석을 통해 시스템을 선형화한다. 선형화된 모델을 이용해 루엔버거 관측기로 직류링크 전압을 추정한다. 또 추정치와 실측치의 비교로 센서의 고장을 판단하고 추정치가 측정치를 대체 가능함을 보인다.

2. PWM 컨버터

2.1 시스템 모델링

계통 연계형 3상 AC/DC/AC PWM 컨버터는 그림 1과 같다.

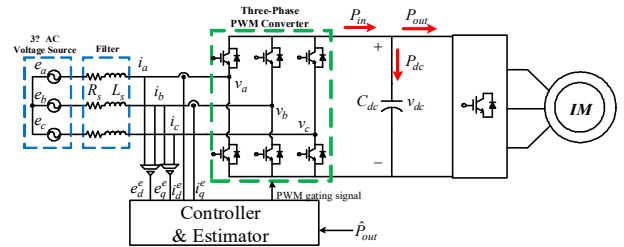


그림 1 Back-to-Back AC/DC/AC PWM 컨버터

Fig. 1 Back-to-Back AC/DC/AC PWM converter

시스템은 전력변환장치, 고조파 제거용 필터 3상 계통전원전압, 부하로 구성된다. 여기서, e_a, e_b, e_c 는 입력 상전압, i_a, i_b, i_c 는 입력전류, v_a, v_b, v_c 는 그리드에서 본 컨버터 측 전압 v_{dc} 는 직류 출력전압이다. 또 R_s, L_s 는 교류 측 저항과 인덕턴스 C_{dc} 는 직류 측 커패시턴스를 나타낸다. 그림 1과 같이 L필터를 갖는 3상 AC/DC PWM 컨버터의 각 상에 대한 전압방정식을 d-q 변환하고, 전력 평형식을 정리하여 상태방정식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + gu \\ y &= h(x) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$$f(x) = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s}i_d^e + \omega_c i_q^e - \frac{1}{L_s}d_d^e v_{dc} \\ -\frac{R_s}{L_s}i_q^e - \omega_c i_d^e - \frac{1}{L_s}d_q^e v_{dc} \\ 1.5 \left(\frac{e_d^e i_d^e}{C_{dc} v_{dc}} + \frac{e_q^e i_q^e}{C_{dc} v_{dc}} \right) - \frac{P_{out}}{C_{dc} v_{dc}} \end{bmatrix} \quad gu = \begin{bmatrix} -\frac{e_d^e}{L_s} \\ \frac{e_q^e}{L_s} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$h(x) = [i_d^e \ i_q^e]^T$ 이다.

위 식은 비선형 시변 방정식이다. 소신호 분석을 통해 선형화하면 식 (2)와 같다.^[4]

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + D \\ y &= Cx(t) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $u(t) = [e_d^e \ e_q^e \ d_d^e \ d_q^e]^T$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \omega_e & -\frac{D_{d0}^c}{L_s} \\ -\omega_e & -\frac{R_s}{L_s} & -\frac{D_{q0}^c}{L_s} \\ \frac{1.5E_{d0}^c}{C_{dc}V_{dc0}} & \frac{1.5E_{q0}^c}{C_{dc}V_{dc0}} & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 & -\frac{V_{d0}}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} & 0 & -\frac{V_{d0}}{L_s} \\ \frac{1.5E_{d0}^c}{C_{dc}V_{dc0}} & \frac{1.5E_{q0}^c}{C_{dc}V_{dc0}} & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_{out}/C_{dc}V_{dc0} \end{bmatrix} \text{ 이다.}$$

2.2 직류링크 전압 관측기 설계

2.1에서 선형화한 시스템 모델링을 토대로 루엔버거 관측기를 구성하면 다음과 같다.

$$\dot{\delta\hat{x}}(t) = A\delta\hat{x}(t) + B\delta\hat{u}(t) + K(\delta y(t) - \delta\hat{y}(t)) + D\hat{e}(t) \quad (3)$$

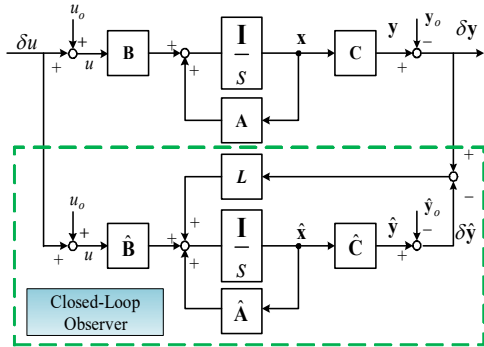


그림 2 루엔버거 관측기

Fig. 2 Luenberger Observer

식 (3)과 그림 2는 관측기의 성능이 이득 L에 의해 조절될 수 있음을 의미한다. 관측기의 이득은 시스템의 극을 정하고 계수를 비교하는 방법으로 구할 수 있다. 시스템의 극점을 $p, a \pm jb$ 로 설정한다.

2.3 전압센서 고장진단

센서고장의 주요 원인은 이득, 오프셋, 포화 혹은 개방 고장이 있다. 본 논문에서는 100% 이득 고장에 관해서 살펴본다. 앞에서 설명한 상태관측기로 추정된 값을 직류링크 센서 측정치와 비교하여 고장 판별을 한다. 정상상태일 경우, 고장 판단 신호의 값은 0이다. 만약 측정치와 추정치의 차가 threshold 값보다 커지면 고장 판단 신호에서 1의 값을 나타내고, 측정치를 추정치가 대체하게 된다. 위 관계를 수식으로 표시하면 식 (4), (5)와 같고, 그림 3은 순서도를 나타낸다.

$$r(t) = \frac{|v_{dc} - \hat{v}_{dc}|}{v_{dc}^*} * 100 \quad (4)$$

$$r(t) < V_{th}, F_f = 0 \text{ or } r(t) \geq V_{th}, F_f = 1 \quad (5)$$

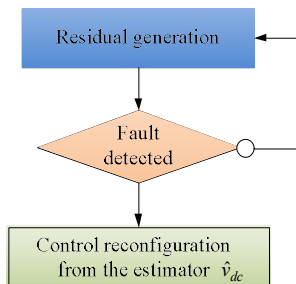


그림 3 직류링크 전압센서 고장 허용제어 순서도

Fig. 3 Flowchart of fault tolerant control

2.4 시뮬레이션

제안한 직류링크 전압 추정 및 고장허용제어 방법의 타당성을 검증하기 위하여 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 3상 전원 전압은 220 [V_{rms}], 60 [Hz]이고, 스위칭 주파수는 5[kHz], 직류링크전압지령은 340[V]이다. 전원측 부스트 필터 인덕턴스와 저항은 각각 3.3[mH] 과 0.1[Ω]이다.

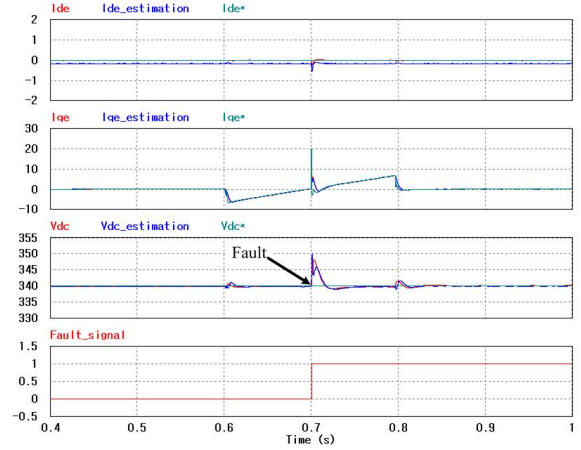


그림 4 Back-to-Back 컨버터 유도기 구동 시 직류링크 전압센서 고장 허용제어

Fig. 4 DC link voltage sensor fault tolerant control on operating induction motor by Back-to-Back converter

3. 결 론

본 논문은 계통 연계형 전압형 3상 AC/DC/AC PWM 컨버터의 직류링크 전압추정을 위하여 전력평형모델기반 관측기를 이용하고, 직류링크 전압센서 고장 시 추정치로 측정치를 대체하는 고장허용제어 방법을 제안하였다. 센서 고장 시 추정치를 이용하여 시스템을 안정하게 제어함으로써, 센서 고장 시에도 운전이 가능함을 확인하였다.

본 연구는 지식 경제부의 지원에 의하여 한국에너지기술 평가원 (20091020300380-11-2-100) 주관으로 수행된 과제임

참 고 문 헌

- [1] S. K. Sul "Control of Electric Machine Drive Systems" Wiley Book. 2010.
- [2] Z. Wang and L. Chang " A DC Voltage Monitoring and Control Method for Three-Phase Grid-Connected Wind Turbine Inverters." *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 23, no. 3, pp. 1118-1125, May 2008.
- [3] A. Sarinana, "A Novel Sliding Mode Observer Applied to the Three-phase Voltage Source Inverter." in *Proc. of EPE*, pp. 1-12, 2005
- [4] H. Mao and F. C. Y. Lee, "Novel Reduced-order Small-signal Model of Three-phase PWM Rectifiers and Its Application in Control Design and System Analysis." *IEEE Trans. on Power Electron.* vol. 13, no. 3, pp. 511-521, May 1998.