

NPC 인버터 시스템에서 개방성 고장시 PWM 특성을 이용한 새로운 고장 검출 방법

김태진*, 이정대*, 하동현**, 현동석*
한양대학교*, 현대로템기술연구소**

A Novel Fault Detection Method using the PWM characteristic at Open-Circuit Fault in NPC Inverter Systems

Tae-Jin Kim*, Jung-Dae Lee*, Dong-Hyun Ha**, Dong-Seok Hyun*
Hanyang University*, Hyundai-Rotem Company**

Abstract - 본 논문은 NPC 인버터(Neutral-point-clamped Inverter) 시스템을 구성하는 스위칭 소자에 개방성 고장이 발생하였을 경우 인버터 시스템의 고장 검출을 위한 새로운 고장 검출 방법을 제안하였다. 이 방법은 CPWM(continuous-PWM) 고유의 특성을 이용하기 때문에 간단한 알고리즘으로서 구현이 용이할 뿐만 아니라 기존의 방법보다 빠른 고장 검출 능력을 가진다. 빠른 고장 검출 능력은 고장 검출 시간의 지연에서 올 수 있는 직류-링크 커패시터의 전압 불평형 문제 및 이로 인한 다른 스위치로의 전압 스트레스 증가에 의한 소자 파괴와 같은 악영향을 개선시킬 수 있다. 제안된 방법의 타당성을 입증하기 위하여 실험을 수행하였다.

1. 서 론

최근 전력전자 시스템은 전력의 효율적 이용 측면이라는 성능 개선뿐만 아니라 고장 발생시 전력 변환 시스템 자체의 연속적인 동작을 보장하는 고 신뢰성이 요구되고 있다. 인버터 시스템의 연속적인 동작을 방해하는 고장으로 전원공급원에서의 일선 지락, 정류기 다이오드의 단락, 커패시터의 파괴, 부하 회로의 단락, 스위칭 소자의 고장, 전압·전류 센서의 고장 등 다양한 형태의 고장들이 있다[1].

NPC 인버터 시스템은 기존 2-레벨 인버터 시스템 보다 두 배의 스위칭 소자를 사용하므로 스위칭 소자에 대한 고장의 가능성이 상대적으로 증가된다.

본 논문은 스위칭 소자에서 개방성 고장 발생시 최대 두 샘플링 시간(2Ts) 이내에 고장을 검출할 수 있는 방법을 제안하였다. 이 방법은 기존의 Ribeiro가 제안한 방법[2]과 동일하게 전압의 측정을 요구하지만, 측정된 전압을 그 전압의 지령치와 비교하지는 않으므로 간단하고 빠른 고장 검출 능력을 가진다. 제안된 방법은 스위칭 소자의 개방성 고장을 검출하기 위하여 절반의 샘플링 주기 내에 인버터 출력 폴 전압의 상태가 변하는 CPWM(continuous-PWM)의 고유한 특성을 이용한다. 이 특성은 결과적으로 정상 동작 조건하에서 폴 전압의 상태가 변화 없이 유지될 수 있는 최대 시간을 한 샘플링 시간 보다 작다는 것이다. 비록 제안된 방법이 CPWM에만 국한되지만 상용 NPC 인버터 시스템이 SPWM이나 SVPWM과 같은 CPWM을 사용하므로 대부분의 시스템에 적용 가능하다. 제안한 고장 검출 시스템의 타당성을 입증하기 위해 고장 허용 제어 기법을 적용한 3-레벨 NPC 인버터 시스템을 제작하여 실험을 수행하였다.

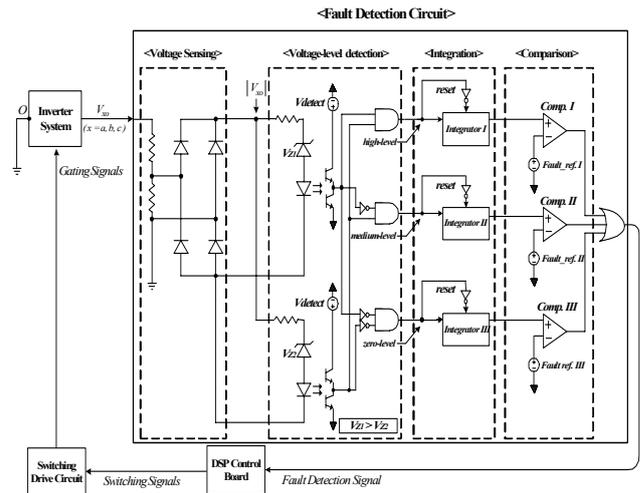
2. 본 론

스위칭 소자의 개방성 고장 발생시 폴 전압 변화 분석으로부터 전압 크기의 구분과 이것의 유지 시간을 안다면 스위칭 소자의 개방성 고장을 판단 할 수 있다.

그림 1은 스위칭 소자에서 개방성 고장이 발생하였을 때 고장을 판단하기 위해 본 논문에서 제안되어진 회로이다. 제안된 회로는 고장 발생시 나타나는 출력 폴 전압 분석을 근거로 하여 설계한 것이며 절대값 회로를 포함하는 폴 전압 검출부, 전압 레벨 검출부, 적분부, 그리고 비교부로 구성된다.

2.1 폴 전압 검출부

제안된 방법은 PWM 고유의 특성을 이용하기 때문에 정확한 고장 스위치 위치를 파악하지 않고도 고장상의 확인이 가능하다. 이 방법은 극성을 제외한 폴 전압의 크기와 이것의 유지 시간 측정이 요구된다. 폴 전압 검출을 위해 분압 저항을 사용하였으



〈그림 1〉 제안한 개방성 고장 검출 회로

며, 측정된 폴 전압의 크기만 확인하기 위해 전과 정류 회로가 사용되었다.

2.2 전압-레벨 검출부

제안한 방법은 검출된 폴 전압 크기에 대해 전압-레벨의 구분을 필요로 한다. 분압 저항을 통해 검출된 폴 전압은 전과 정류 회로를 거쳐 극성이 제거된 폴 전압(|Vx0|)으로 변환되고 이것은 세 가지 전압 레벨로 분류할 수 있으며 각각 high-레벨 (+Vdc/2 또는 -Vdc/2), zero-레벨(0) 그리고 medium-레벨 (+Vdc/4 또는 -Vdc/4)로 정의된다. 그림 1의 고장 검출 회로에서 보여지듯이 제너 다이오드와 포토커플러를 이용하여 간단한 논리회로를 설계함으로써 |Vx0|의 전압-레벨 구분이 가능하며 고가의 절연 증폭기를 대체 시킬 수 있다. 이 회로에서 |Vx0|가 제너 전압 Vz1 보다 크면 high-레벨, 제너 전압 Vz2 보다 작으면 zero-레벨, 그 밖의 경우는 medium-레벨이다.

2.3 적분부

전 단계의 전압-레벨 검출 및 구분이 고장 판단을 의미하는 것은 아니다. 왜냐하면 고장 발생이후 인버터 출력 폴 전압은 고장 이전과 마찬가지로 정상 전압에 해당하는 전압-레벨인 high-레벨과 zero-레벨이 전압-레벨 검출부로부터 검출되고, 또한 폴 전압은 high-레벨에서 zero-레벨까지 medium-레벨의 중간 단계 없이 순차적으로 변화되는 것이 아니기 때문에 고장 유무에 관계없이 medium-레벨의 폴 전압은 유지되는 시간의 차이만 있을 뿐 항상 존재한다.

고장 전과 후의 차이점은 고장 스위치의 위치와 동작 조건에 따라 하나 또는 두개의 전압-레벨에 대한 유지 시간이 정상 동작시 나타날 수 있는 최대 유지 시간보다 길어진다는 것이다. 그러므로 고장 판단을 위해서는 전압-레벨의 구분뿐만 아니라 전압-레벨의 유지 시간을 검출하는 것이 필요하다. 각 전압-레벨에 대한 유지 시간은 세 개의 적분부를 이용해 시간의 정보를 전압의 크기로 변환하여 간접적으로 검출할 수 있다.

2.4 비교부

최종적으로 스위칭 소자의 개방성 고장을 판별하기 위해 각각의 적분기 회로 출력은 세 가지로 구분된 전압-레벨들의 정상 동작에 해당하는 고장 레퍼런스(*Fault_ref. X*)와 비교되며, 이 고장 레퍼런스는 정상 동작 조건하에서 각 전압-레벨에 대한 최대 유지 가능한 시간으로부터 결정된다. 고장 레퍼런스는 식 (1)으로써 정의 할 수 있다.

$$\begin{aligned} Fault_ref.X &= \int_0^{T_x} K \cdot V_{detect} \cdot dt \\ &= K \cdot V_{detect} \cdot T_x \end{aligned} \quad (1)$$

for $x = I, II, \text{ and } III$

여기서 T_x 는 각 전압-레벨에 대한 최대 유지 가능 시간이며, K 는 적분기 이득, V_{detect} 는 적분기 입력전압이다.

T_I 와 T_{III} 는 정상 상태 *high*-레벨과 *zero*-레벨에 대한 최대 유지 가능 시간이며, 폴 전압 분석으로부터 각각 1 샘플링($1T_s$)과 1.5 샘플링 시간($1.5T_s$)이 된다. 즉 $T_I=1T_s$ 그리고 $T_{III}=1.5T_s$ 이다. 만약 고정된 변조 지수를 사용하는 인버터인 경우 빠른 고장 검출을 위해 변조지수에 따라 T_I 와 T_{III} 는 이 최대 유지 가능 시간 내에서 조정이 가능하다. 이것은 변조지수가 감소함에 따라 *high*-레벨의 최대 유지 가능 시간이 $1T_s$ 보다 감소되며, 변조지수가 증가함에 따라 *zero*-레벨의 최대 유지 가능 시간이 $1.5T_s$ 보다 감소되기 때문이다.

스위칭 소자가 이상적인 경우라고 가정하면 정상 상태에서 *medium*-레벨에 대한 유지 가능 시간인 T_{II} 는 0이다. 그러나 실제 스위칭 소자는 턴-온 시간과 턴-오프 시간이 존재하기 때문에 *medium*-레벨 유지 가능 시간인 T_{II} 는 분명히 존재한다. 정상 동작하는 동안 *medium*-레벨 전압의 T_{II} 는 한 샘플링 시간보다 훨씬 짧으며, 거의 0에 가깝지만 정확한 고장 검출을 위해서는 고려되어야만 한다. 여기서 주의해야 할 점은 T_{II} 뿐만 아니라 T_I 와 T_{III} 도 이러한 실제적인 스위칭 특성을 고려해야 한다는 것이다.

실제 구현을 위해서는 스위치의 특성뿐만 아니라 게이트 드라이버 특성, 데드타임 등 여러 가지 실험 조건을 고려하여야 한다. 따라서 실제 고장 진단을 하기 위해 고장 레퍼런스는 이론적 계산에 의한 T_x 로부터 구하는 것 보다 실험을 통해 직접적으로 고장 레퍼런스를 구하는 것이 요구된다. 위에서 설명한 T_x 시간은 고장 판단을 위한 적분기 이득 값 설계에 사용된다.

3. 실험 결과

제안된 고장 검출 방법의 타당성을 증명하기 위해 고장 허용 능력을 갖는 NPC 인버터 시스템을 디지털 신호처리기(DSP) TMS320C31과 EPLD EPM7128EL84-12를 사용하여 제작하였다[3].

실험은 제안한 고장 검출 방법을 기존 고장 허용 제어 NPC 인버터 시스템에 적용하고, 이 시스템의 'a'상 스위치들 중 부하 출력선 기준 내측 상단부 스위치에 개방성 고장을 발생시켰다.

그림 2는 고장상 'a'에서 폴 전압, 상전류, 고장 스위치의 스위칭 신호 그리고 고장 검출 신호 파형 나타난다.

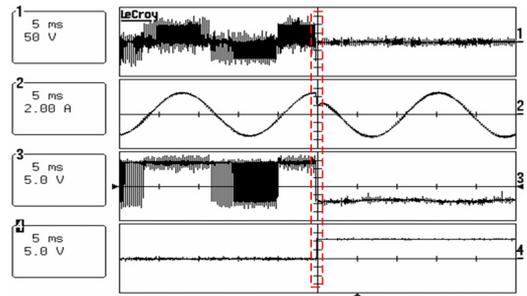
그림 3은 고장 검출이후 고장 허용 제어에 의해 변화되어지는 지령 폴 전압 신호들을 나타낸다.

그림 4는 고장 발생 전과 후의 NPC 인버터 시스템 상전류 변화를 나타내며 고장이 발생한 이후에도 정상적인 동작이 가능함을 확인할 수 있다.

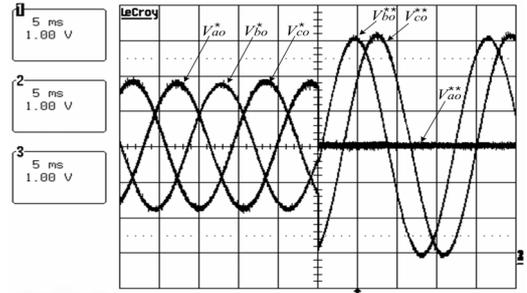
4. 결 론

본 논문은 3상 NPC PWM 인버터의 스위칭 소자에 개방성 고장이 발생하였을 경우 고장 검출을 위한 새로운 진단법을 제안하였다.

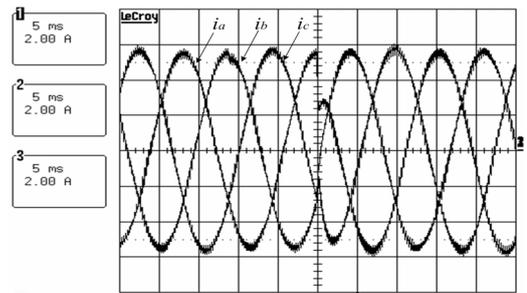
제안한 고장 검출 방법은 PWM 인버터의 고유 특성을 이용하여 고장 검출 및 확인이 가능하다. 이 방법으로부터 고장 조건의 검출은 최대 두 샘플링 시간($2T_s$) 내에 가능하며, 기존 방법들 중 가장 빠른 고장 검출 시간인 기본과 한 주기의 1/4이라는 시간에 비해 더욱 빠른 고장 검출 능력을 갖는다. 이러한 고장 검출 능력을 갖는 새로운 고장 검출 시스템을 기존의 고장 허용 방법과 통합하여 적용할 경우, 고장 발생과 고장 보상 사이의 시간동안 발생하는 악영향을 최소화함과 동시에 제어 성능을 빠르게



〈그림 2〉 고장 상에서 폴 전압, 상전류, 고장 스위치의 스위칭 신호, 그리고 고장 검출 신호



〈그림 3〉 지령 폴 전압 신호



〈그림 4〉 출력 상전류

게 회복하여 인버터 시스템의 연속적인 운전이 가능하도록 한다. 또한 이 방법은 기존 인버터 시스템에 간단한 고장 검출 회로를 추가함으로써 쉽게 구현 가능하다는 장점을 갖는다. 기존 고장 허용 인버터 시스템에 제안한 새로운 고장 검출 방법을 통합시켜 보다 강인한 NPC PWM 인버터 시스템을 구현하였으며 실험을 통하여 이 방법의 신뢰성과 우수성을 입증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] D. Kastha, and B. K. Bose, "Investigation of fault modes of voltage-fed inverter system for induction motor drive," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 30, no. 4, pp. 1208-1038, Jul./Aug. 1994.
- [2] R. L. de Araujo Riberio, C. B. Jacobina, E. R. C. da Silva, and A. M. N. Lima, "Fault detection of open-switch damage in voltage-fed PWM motor drive systems," IEEE Trans. Power Electron., vol. 18, no. 2, pp. 587-593, Mar. 2003.
- [3] G. T. Park, T. J. Kim, D.W. Kang, and D. S. Hyun, "Control method of NPC inverter for continues operation under one phase fault condition," in Conf. Rec. IEEE Industry Applications Society Annu. Meeting, Seattle, USA, pp. 2188-2193, 2004.