

3상 NPC 인버터의 한상 고장시 연속적인 운전을 위한 제어기법

박건태, 김태진, 강대욱, 현동석
한양대학교 전기공학과

Control Method of NPC Inverter for Continuous Operation Under One Phase Fault Condition

Gun-Tae Park, Tae-Jin Kim, Dae-Wook Kang, Dong-Seok Hyun
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

ABSTRACT

The reliability of power electronics system is very important in industrial, commercial and military applications. This paper presents the principles for NPC inverter as an available technology for the design and implementation of adaptive fault tolerant systems. The fault tolerance is obtained by the use of the particular construction. The control method is proposed to get the sinusoidal load current with constant amplitude. The strategy described in this paper is expected to provide an economic alternative to more expensive redundancy techniques which find justification only in a few specialized application.

1. 서 론

최근에, 멀티-레벨 인버터는 고압 대용량 인버터 시스템을 위한 토폴로지로써 관심이 증대되고 있다^[1,2]. 멀티-레벨 인버터는 고압 대용량에 적합한 장점을 가지고 있다. 이러한 멀티-레벨 인버터는 크게 다이오드 클램프 인버터, 캐스캐이드 인버터, 플라잉 커패시터 인버터^[3,4,5]가 있으며 현재 3-레벨 다이오드 클램프 방식인 Neutral Point Clamped(NPC) 인버터가 가장 널리 사용되고 있다.

NPC 인버터는 기존의 2-레벨 인버터에 비해 전동기 전류의 왜형률을 효과적으로 감소시킬 수 있고 DC-링크 전압을 단일 전원을 사용하여 충전할 수 있다는 장점 등의 이유로 광범위한 분야에서 사용되고 있다^[6].

NPC 인버터 시스템은 기존의 인버터 시스템과는 다른 구조적인 특징으로 스위칭 소자 파괴로 인한 시스템 고장시 직렬 연결된 DC-링크 커패시터 전압의 불균형을

발생시켜 고장 발생 상뿐만 아니라 다른 상의 스위칭 소자에도 전압스트레스를 가중시켜 연속적인 스위칭 소자의 파괴를 발생시킨다.

현재까지 NPC 인버터 시스템을 구성하는 전력용 반도체 소자의 제한된 수명 및 고장으로 인해 발생하는 문제에 관한 대책 방안은 잉여의 NPC 인버터 시스템을 추가한 병렬운전을 통해 이루어졌으나 설치비용의 증가를 초래해왔다.

본 논문은 NPC 인버터 시스템의 토폴로지 특성을 이용한 한 상 고장시 안정한 시스템의 적용을 위한 연구로서 고장 상을 모션에서 분리한 후 나머지 상을 이용하여 3상 평형의 전류를 부하에 공급함으로써 부하의 연속적인 운전을 가능하게 한다. 제안된 방법의 타당성은 시뮬레이션을 통해 증명된다.

2. NPC 인버터 고장시 제안된 NPC 2레그 인버터의 시스템 구조 및 제어방법

2.1 NPC 2레그 인버터의 구조

NPC 인버터의 고장은 부하에 공급되는 부하전류의 왜형률을 저감시키고 역률을 감소시키는 등 많은 문제점들을 발생시키게 하여 결국 부하의 운전을 정지 시킨다.

NPC 인버터의 고장은 AC-전원단의 지락 및 단락으로 인한 고장, 정류기를 구성하는 다이오드의 고장, 부하단에 연결되는 부하선의 지락에 관한 고장 그리고 전력용 반도체 소자의 쇼트나 오픈으로 인한 고장등 여러 가지 유형이 있다.

본 논문에서는 여러 가지 고장 유형 중 전력용 반도체 소자의 고장시 NPC 인버터의 안정된 시스템 적용을 위한 설계와 동작에 대하여 제안된 방법을 통하여 알아본다.

그림 1은 정상 운전상태의 NPC 인버터의 회로도이고 표 1은 각 인버터의 스위칭 상태와 그에 해당하는 인버터 레그 출력 전압을 나타낸다.

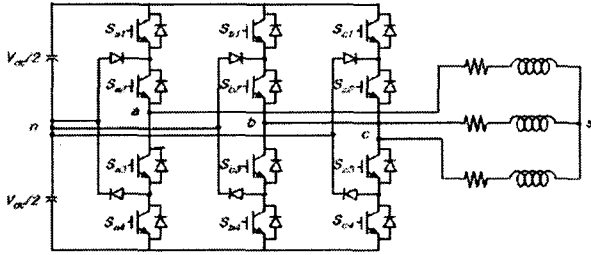


그림 1 정상상태시 NPC 인버터의 회로도
Fig. 1 Schematic of NPC inverter in normal operation

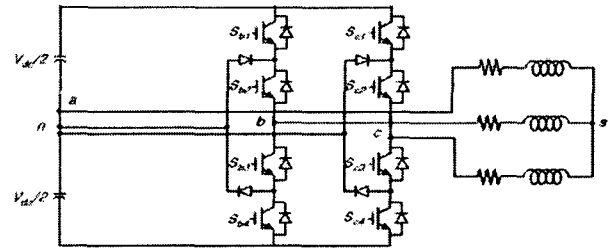


그림 2 a상 고장시 제안된 NPC 2레그 인버터의 회로도
Fig. 2 Schematic of proposed NPC 2leg inverter in faulty operation(Phase a)

표 1 NPC 인버터의 스위칭 상태
Table 1 Switching states in NPC inverter

Switching States S _x (x=a,b,c)	Switching Sequence				Output leg Voltage (V _{xn})
	S _{X1}	S _{X2}	S _{X3}	S _{X4}	
P	ON	ON	OFF	OFF	V _{dc} /2
O	OFF	ON	ON	OFF	0
N	OFF	OFF	ON	ON	-V _{dc} /2

각 상에는 P, O, N 세 종류의 스위칭 상태가 있고 3상 NPC 인버터에는 모두 27개의 스위칭 상태가 존재한다.

기존에는 NPC 인버터의 고장시 보수를 위해 부하의 운전을 중지 하거나 고장시 대책으로 병렬운전을 하였다. 그러나 모든 부하에 있어서 이러한 방법들은 대안책이 될 수가 없다.

제안된 방법은 NPC 인버터의 한 스위칭 소자가 파괴되었을 경우 그 스위칭 소자가 연결되어 있는 레그를 모선에서 분리한 후 분리된 레그가 속한 상을 DC-링크단 커패시터 사이의 중성점(n점)에 연결하여 줌으로써 그림 2와 같이 표현할 수 있으며 본 논문에서는 a상을 고장상으로 가정하였다.

정상 상태 NPC 인버터에 정현파 변조 방법(SPWM)을 이용할 경우 120° 위상 차이가 나는 3개의 상전압지령치와 삼각파를 비교하여 주었다.

그러나 고장상태시 제안된 NPC 2레그 인버터의 경우에는 기존의 상전압 지령치를 이용할 경우 부하전류의 불평형이 발생하게 되어 부하를 구동 시킬 수 없다. 따라서 새로운 방법이 모색되어야 하며 이는 선간전압을 지령치로 사용함으로써 해결할 수 있다.

2.2 NPC 인버터의 한상 고장시 제어방법

그림 2에서 부하측에 인가되는 전압 V_{as}, V_{bs}, V_{cs}는 선간전압 V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}에 의해 공급받게 된다. b상과 c상의 경우에는 지령전압을 줄 수 있지만 a상의 경우 지령전압을 줄 수 없으므로 각각의 지로에 위치한 b, c상이 분리

된 커패시터 사이에 있는 a상에 어떠한 상관 관계를 가지는지 살펴볼 필요가 있다.

이것은 V_{ba}, V_{ca}로 나타낼 수 있으며, 2개의 선간전압 V_{ba}, V_{ca}는 8개의 스위치와 8개의 다이오드 동작으로 발생하게 되며 V_{bc}는 식 (1)과 같이 키르히호프 전압법칙에 의해 발생하게 된다. 즉 V_{ba}, V_{ca}의 상관 관계를 폐이 저도로 살펴보면 그림 3과 같다.

$$V_{bc} = V_{ba} - V_{ca} \quad (1)$$

$$V_{ca} = V_{bc} - 60^\circ \quad (2)$$

$$V_{ba} = V_{bs} - V_{as} \quad (3)$$

$$V_{ca} = V_{cs} - V_{as}$$

$$V_{bc} = V_{bs} - V_{cs}$$

식 (2)와 (3)에서 알 수 있듯이 V_{ba}와 V_{ca}는 60°의 위상 차이가 나타나게 되고, 선간전압 V_{ba}, V_{ca}를 지령전압으로 하여 부하상전압 V_{as}, V_{bs}, V_{cs}을 발생시킬 수 있다. 즉 고장 상태시에 제안된 NPC 2레그 인버터 부하상전압의 크기는 정상상태에서 NPC 인버터가 출력하는 부하상전압의 1/√3 크기를 가지게 된다.

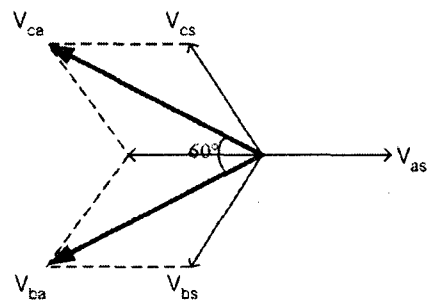


그림 3 60° 위상차를 가진 2개의 전압원으로 3상을 공급
Fig. 3 Supplying three-phase from two voltage sources with 60° phase shift

3. NPC 2레그 인버터의 분석

정상 상태에서의 NPC 인버터와 비교해서 NPC 2레그 인버터의 스위칭 상태에 따른 부하상전압과 d-q 변환 이론에 의한 식 (4)에 따른 V_d-V_q 값을 표 2에 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (4)$$

표 2 NPC 2레그 인버터의 스위칭 상태
Table 2 Switching states in NPC 2leg inverter

Switching State	V_{as}	V_{bs}	V_{cs}	V_d	V_q
NN	$V_{dc}/3$	$-V_{dc}/6$	$-V_{dc}/6$	$V_{dc}/3$	0
ON	$V_{dc}/6$	$V_{dc}/6$	$-V_{dc}/3$	$V_{dc}/6$	$V_{dc}/2\sqrt{3}$
NO	$V_{dc}/6$	$-V_{dc}/3$	$V_{dc}/6$	$V_{dc}/6$	$-V_{dc}/2\sqrt{3}$
PN	0	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	0	$V_{dc}/\sqrt{3}$
OO	0	0	0	0	0
NP	0	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	0	$-V_{dc}/\sqrt{3}$
PO	$-V_{dc}/6$	$V_{dc}/3$	$-V_{dc}/6$	$-V_{dc}/6$	$V_{dc}/2\sqrt{3}$
OP	$-V_{dc}/6$	$-V_{dc}/6$	$V_{dc}/3$	$-V_{dc}/6$	$-V_{dc}/2\sqrt{3}$
PP	$-V_{dc}/3$	$V_{dc}/6$	$V_{dc}/6$	$-V_{dc}/3$	0

표 2의 스위칭 상태는 그림 2에서와 같이 a상 고장시 b와 c상의 스위칭 상태로써 S_{x1} , S_{x2} 가 ON일 경우에는 P, S_{x2} , S_{x3} 가 ON일 경우에는 O, S_{x3} , S_{x4} 가 ON일 때는 N으로 나타내었다.

그림 4는 27개의 스위칭 상태를 가지는 NPC 인버터와 9개의 스위칭 상태를 가지는 NPC 2레그 인버터의 공간벡터도를 나타낸다. 그림 4에서 보여지듯이 NPC 2레그 인버터는 스위칭 상태의 리턴던시가 존재하지 않음을 알 수 있다. 공간벡터 상에서 정상상태에서의 NPC 인버터 스위칭 벡터들의 모양이 육각형의 형태를 가지는 것에 반해 NPC 2레그 인버터의 경우 마름모 형태를 가지게 된다.

선형적으로 출력이 가능한 NPC 2레그 인버터의 최대 출력전압은 마름모에 내접하는 원의 반지름으로써 정현파 전압변조 방법을 사용한 정상상태 NPC 인버터가 $V_{dc}/2$ 전압을 출력할 수 있는 경우에 반해 NPC 2레그 인버터는 $V_{dc}/2\sqrt{3}$ 전압을 출력함을 알 수 있고, 이는 앞절에서 페이지도로 살펴본 바와 일치한다.

NPC 2레그 인버터는 그림 5와 같이 6개의 섹터로 나눌 수 있으며 표 3에 보여 지듯이 한 섹터에서 3개의 벡터 시퀀스를 가지게 되며, 인접한 세 벡터를 합성하여 인버터의 출력전압을 생성함을 알 수 있다.

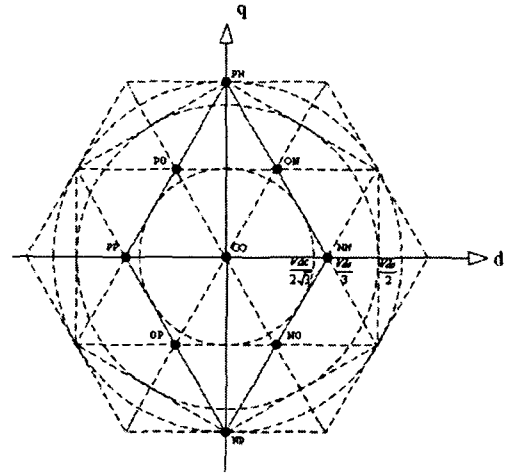


그림 4 공간 전압 벡터도
Fig. 4 Space voltage vector diagram

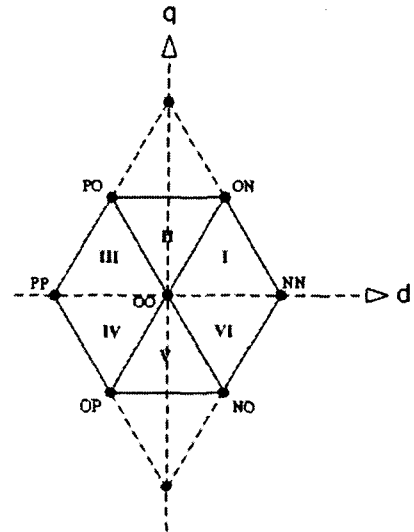


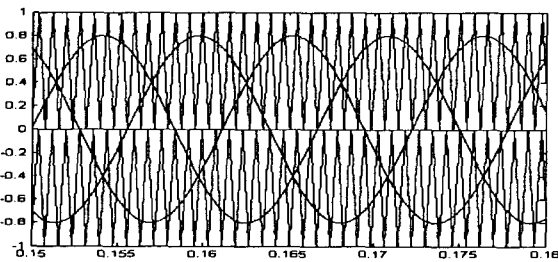
그림 5 PC 2레그 인버터의 공간 전압 벡터
Fig. 5 Space voltage vector diagram in NPC 2leg inverter

표 3 NPC 2레그 인버터의 스위칭 상태
Table 3 Switching states in NPC 2leg inverterSpace voltage vector diagram

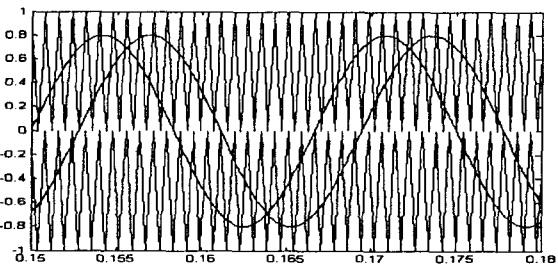
Sector I	OO ⇒ ON ⇒ NN
Sector II	PO ⇒ OO ⇒ ON
Sector III	PP ⇒ PO ⇒ OO
Sector IV	PP ⇒ OP ⇒ OO
Sector V	OP ⇒ OO ⇒ NO
Sector VI	OO ⇒ NO ⇒ NN

4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 NPC 인버터의 고장시 제안된 NPC 2레그 인버터의 타당성을 입증하기 위해 PSIM을 이용해 시뮬레이션을 수행하였고 사용된 조건은 $V_{dc}=300[V]$, $R=5[\Omega]$, $L=20[mH]$, $C=1000[\mu F]$, 삼각파 주파수(f_c)= $1260[Hz]$, 변조지수(MI)= 0.8 이다. 그림 6(a)는 정상상태시 NPC 인버터의 정현파 변조방법을 나타낸 것으로 각 지령값은 120° 의 위상차를 가지고 있다. 그림 6(b)는 NPC 2레그 인버터의 정현파 변조 방법으로 a상 고장시 60° 위상차가 나는 선간전압 V_{ba} , V_{ca} 를 삼각파와 비교한다. 그림 7은 각 상태에서 부하상전압과 부하전류를 비교한 것으로서 그림 7(a)는 정상상태 NPC 인버터의 동작시 부하상전압과 부하전류를 나타낸 것으로 3상 모두 평형을 이루고 있다. 그림 7(b)는 NPC 인버터의 한상(a상) 고장시로서 3상이 불평형하게 나타난다. 그림 7(c)는 NPC 2레그 인버터에 그림 6(b)에서 보여진 지령전압과 삼각파를 이용한 것으로서 부하상전압과 부하전류가 3상 평형하게 나타난다. 그림 8은 NPC인버터와 NPC 2레그 인버터의 부하상전압을 FFT하여 DC-링크 전압 이용율을 비교한 것으로서 NPC 2레그 인버터의 출력 전압은 정상상태 NPC 인버터가 출력하는 전압의 $1/\sqrt{3}$ 크기를 가짐을 알 수 있다.



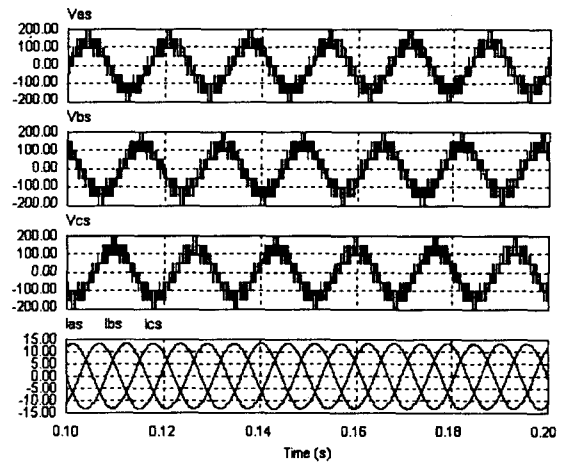
(a)



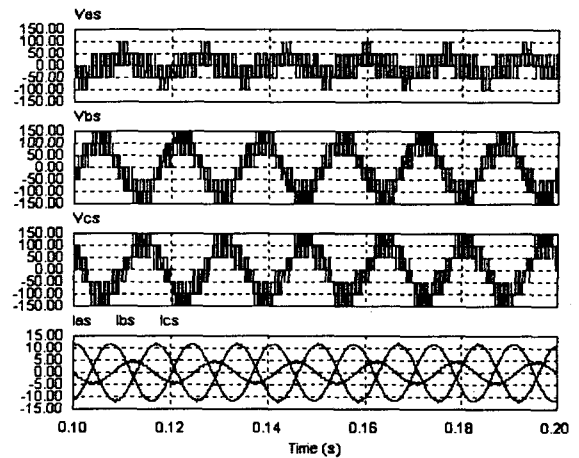
(b)

그림 6 펄스폭 변조 방법 (a)NPC 인버터 (b)NPC 2레그 인버터

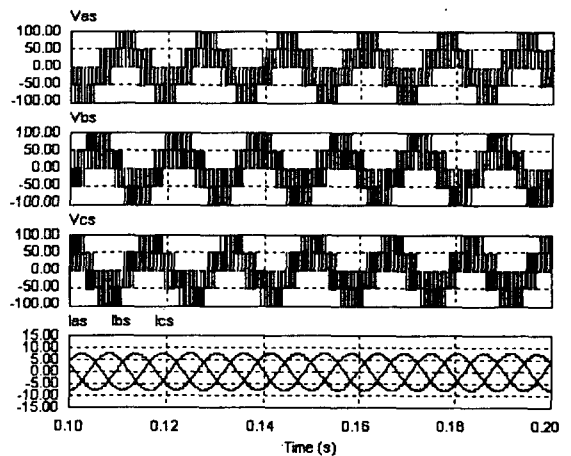
Fig. 6 PWM Method (a)NPC inverter (b)NPC 2leg inverter



(a)



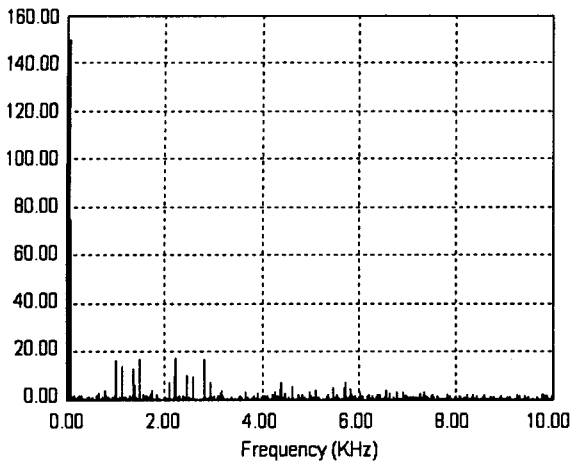
(b)



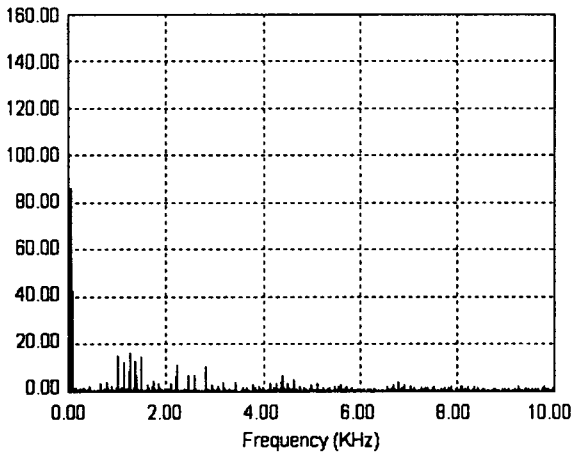
(c)

그림 7 상전압과 부하전류 비교 (a)정상상태시 (b)a상 고장시 (c)제어기법을 사용시

Fig. 7 Phase voltage and Phase current (a)normal operation (b)faulty operation(Phase a) (c)using control method



(a)



(b)

그림 8 FFT결과

Fig. 8 FFT result

(a)NPC inverter (b)NPC 2leg inverter

5. 결 론

본 논문은 NPC 인버터 시스템 운전 중 스위칭 소자의 파괴에 의한 한상 고장시 인버터 시스템의 신뢰성 및 안정성을 위한 NPC 2레그 인버터와 그 제어법을 소개했다. 제안된 방식은 정상상태 NPC 인버터보다 $1/\sqrt{3}$ 배 적은 전압 이용율을 가지지만, 부하에 3상 평형 전류를 공급함으로써 선박, 잠수함, 지하철도에 이용 가능할 것으로 기대된다. 제안된 논문은 시뮬레이션을 통해 타당성을 입증하였다.

참 고 문 헌

[1] C. Hochgraf, R. Lasseter, D. Divan, and T. Lipo, "Comparison of multilevel inverters for static Var compensation", in *Proc. IEEE Ind. Applicat.*

Soc. Annu Conf., Vol. 2, pp 921-928, 1994.

- [2] R.W.Menzies, P.Steimer, and J.K.Steinke, "Five level GTO inverters for large induction motor drives." in *Conf. Rec. IEEE IAS Annu Meeting.*, pp. 593-601, 1993.
- [3] A. Nabae, I. Takahashi and H. Akagi, "A New Neutral-point-clamped PWM Inverter" *IEEE Trans Ind Applicat.*, Vol. 17, No. 5, pp. 518-523, 1981.
- [4] T. A. Meynard, and H. Foch, "Multi-level conversion: High voltage choppers and voltage-source inverter", in *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, Vol. 1, pp. 397-403, 1992.
- [5] M.Marchesioni, and M. Mazzucchelli and S. Tenconi, "A Non Conventional Power Converter for Plasma Stabilization", *IEEE-PESC conf.Rec.*, pp. 122-129, 1988.
- [6] P.M. Bhagwat, and V.R.Stefanovic. "Generalized structure of a multilevel PWM inverter", *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol.19, No 6, pp. 1057-1069, Nov./Dec. 1983