

3레벨 NPC인버터 고장 시 중성점 전압변동에 관한 연구

박종제, 김태진, 현동석
한양대학교

Study of Neutral Point Potential Variation for Three-Level NPC Inverter under Fault Condition

Jong-Je Park, Tae-Jin kim, Dong-Seok Hyun
Hanyang University

ABSTRACT

Three-level Diode Clamped Multilevel Inverter, generally known as Neutral-Point-Clamped(NPC) inverter, has an inherent problem causing Neutral Point(NP) potential variation. Until now, in many literatures NP potential problem has been investigated and lots of solutions have also been proposed. However, in the case of NP potential variation was rarely published from the standpoint of reliability. In this paper, NP potential is analytically investigated both normal and fault conditions under carrier based PWM. Subsequently, relation between fault detection time and size of capacitor is analyzed. This information is explored by simulation results, which contribute to enhance the reliability of the NPC inverter system.

1. 서론

그림 1 은 최근 대전력 응용부분에서 많은 관심을 받고 있는 3레벨 NPC 인버터를 나타내고 있다. NPC 인버터는 2레벨 인버터에 비해 스위칭 소자의 전압 스트레스를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 출력전압에서 고조파성분을 현저하게 감소시킬 수 있는 이점이 있다. 하지만 3레벨 NPC 인버터는 구조적으로 DC-link단이가 두 개의 커패시터로 직렬연결 되어있기 때문에 그 중성점(Neutral Point : NP)에서 전위가 변동하게 되는데, 이는 시스템의 신뢰성에 큰 영향을 미치는 부분이며 지금까지 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.^{[1]-[2]} 또한, NPC 인버터는 다수의 스위칭 소자를 사용하여 시스템이 구성되므로 2레벨 인버터에 비해 신뢰성이 다소 낮다는 문제점을 갖는다.

최근 전력전자 시스템은 전력의 효율적 이용이라는 측면에서 성능 개선뿐만 아니라 고장 발생 시 전력 변환 시스템 자체의 연속적인 동작을 보장하는 고 신뢰성을 요구하고 있다. 이러한 필요성을 반영하여 최근에는 스위칭 소자에서 고장이 발생하였을 경우 인버터가 저감된 출력 상태로 동작하지만 연속적인 운전이 가능한 고장 허용제어 방법들이 제안되었다.^[3] 이 제어 기법은 고장 검출, 고장 위치 확인, 고장상의 분리 그리고 시스템 재구성으로 순차적으로 이루어진다. 특히 고장 검출은 고장 발생과 시스템의 재구성 사이의 시간동안 발생하는 악영향을 최소화하기 위해 가능한 빠르고 정확해야만 한다. 그렇지 않으면 DC-link단의 중성점을 통한 커패시터의 전압변동이 누

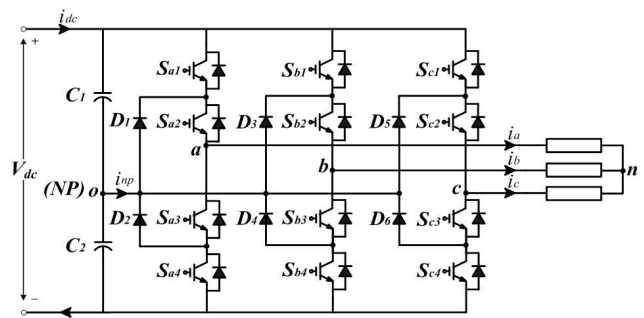


그림 1. NPC 인버터 회로도
Fig 1. Circuit diagram of three-level NPC inverter

적 되어 각 커패시터 사이에 전압편차가 커지게 되고, 결과적으로 하나의 스위칭 소자가 견뎌야 하는 전압의 크기가 소자의 정격전압을 초과하여 시스템 전체에 문제를 일으키게 된다.

본 논문에서는 중성점 전압변동 문제를 정상상태와 고장상태로 나누어 분석한다. 특히 NPC 인버터의 고장상태 시 중성점 전압변동에 관한 연구는 높은 수준의 신뢰성을 요구하는 응용분야에서 고장허용제어가 적용되었을 때 시스템의 신뢰성을 확보할 수 있는 데이터를 제공하여 준다. 그리고 고장허용제어 시 정상적인 시스템 운전을 보장할 수 있는 DC-link 커패시터 용량과 고장검출 시간 사이의 관계를 살펴본다.

2. 중성점 전압해석

2.1 정상상태에서의 중성점 전압변동

NPC 인버터는 각 상에서의 스위칭 상태에 따라 상단 두 개의 스위칭 소자(Sx1, Sx2)가 온일 때는 'P'상태, 가운데 두 개의 스위칭 소자(Sx2, Sx3)가 온일 때는 'O'상태 그리고 하단 두 개의 스위칭 소자가 온일 때는 'N'상태를 가진다. 이에 따른 스위칭 상태와 출력 폴 전압과의 관계를 표 1에 나타내었다.

표 1 스위칭 상태와 NPC 인버터의 폴 전압
Table 1 The switching state and pole-voltage of NPC inverter

Switching States	Status of Switching Device				Pole voltage V_{xo} ($x=a,b,c$)
	Sx1	Sx2	Sx3	Sx4	
P	ON	ON	OFF	OFF	$+V_{dc}/2$
O	OFF	ON	ON	OFF	0
N	OFF	OFF	ON	ON	$-V_{dc}/2$

표 2 크기에 따른 전압벡터의 분류

Table 2 Classification of the output voltage vector according to the magnitude

전압벡터의 분류	스위칭 상태(Sa, Sb, Sc)
Zero vector	(nnn) (ooo) (ppp)
P-type Small vector	(poo) (ppo) (opo) (opp) (oop) (pop)
N-type Small vector	(onn) (oon) (non) (noo) (nno) (ono)
Medium vector	(pon) (opn) (npo) (nop) (onp) (pno)
Large vector	(pnn) (ppn) (nnp) (npp) (nnp) (pnp)

이것을 NPC인버터의 모든 상에 적용하면 모두 27가지의 출력 상태를 갖는다. 또한 이 출력상태는 출력 상전압의 크기에 따라 표 2와 같이 분류할 수 있다. 여기서 Large 벡터와 Zero 벡터는 부하단이 DC-link 중성점과 연결되지 않기 때문에 중성점 전압변동에 영향을 주지 않지만 Small 벡터와 Medium 벡터는 부하단이 직접 중성점에 연결되어 중성점 전압에 영향을 준다. 그림 2에서 스위칭 상태에 따른 중성점 전압변동의 예를 보여주고 있다. 특히, 그림 2(a)는 3상부하가 양(positive)의 직류버스와 중성점'O'가 연결된 P-type Small 벡터를, 2(b)는 음(negative)의 직류버스와 중성점'O'가 연결된 N-type Small 벡터를 나타낸다. 결과적으로 NPC 인버터의 경우 출력단이 DC-link단의 중성점에 연결되면 부하전류의 경로는 이 중성점을 통해 형성되며, 이때 인버터의 DC-link 커패시터는 실제로 그 용량이 충분히 큰 이상적인 전압원이 아니므로 스위칭 상태와 부하전류의 방향에 따라 각각의 DC-link 커패시터에서 전압변동을 일으킨다.

2.2 고장발생시 중성점 전압변동 (a상고장)

그림 3(a)와 3(b)는 각각 a상의 상위 두 스위치 Sa1과 Sa2에서의 개방성 고장 발생 시 동작 가능한 스위치를 나타내고 있다. 핵심공의 어두운 부분은 고장 발생 시 동작 가능한 스위칭 상태를 나타내며 밝은 부분은 동작 불가능한 스위칭 상태를 나타낸다.

2.2.1 Sa1 스위치 고장 시 중성점 전압변동

스위칭 소자 Sa1에서 개방성 고장이 발생하면, 모두 27가지의 스위칭 상태의 조합 중에서 9가지는 동작이 불가능하게 된다. 그 중 P-type Small 벡터(ppo, poo, pop)는 정상상태에서와

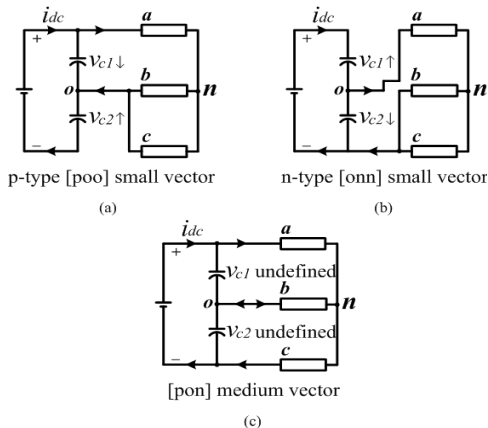


그림 2 스위칭 상태에 따른 중성점(NP) 전압변동
Fig. 2 Effect of switching state on neutral point voltage variation under normal condition

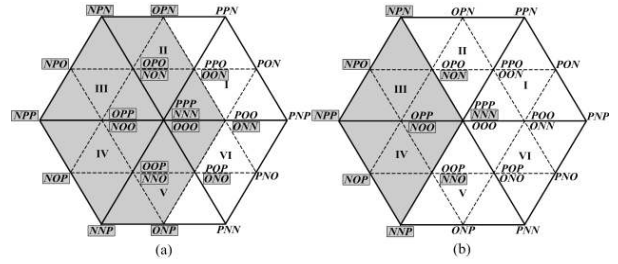


그림 3 스위치의 개방성 고장 발생 시 이용 가능한 스위칭 상태
Fig. 3 Available switching state in fault condition:(a)Sa1 open fault (b)Sa2 open fault

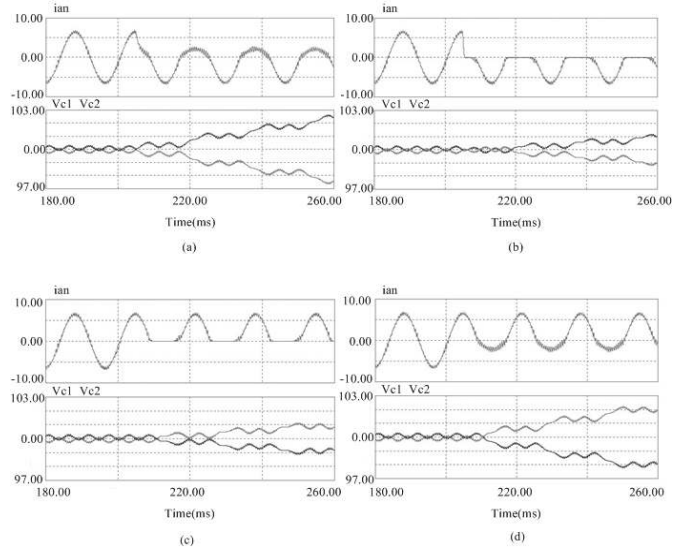


그림 4 고장 발생 시(at 205ms) 부하상전류(ian)와 dc-link 커패시터 전압(Vc1, Vc2) (a) Sa1 fault (b) Sa2 fault (c) Sa3 fault (d) Sa4 fault
Fig. 4 The phase current(ian) and dc-link capacitor voltages (Vc1, Vc2) (a) Sa1 fault (b) Sa2 fault (c) Sa3 fault (d) Sa4 fault

다르게 커패시터전압 Vc1을 감소시키지 못하는 반면 N-type Small 벡터(oon, onn, ono)는 Vc1을 증가시킨다. 그리고 Medium 벡터(pon, pno)는 N-type Small(-on, -no)로 동작하므로 Vc1의 전압을 증가시킨다. 따라서 Sa1 스위치의 개방성 고장 시 전체 중성점 전압은 그림 4(a)와 같이 발산하게 된다.

2.2.2 Sa2 스위치 고장 시 중성점 전압변동

Sa2 스위칭 소자에서 고장이 발생하면 모두 12가지의 스위칭 조합이 동작 불가능한 상태가 된다. 하지만 이 중 P-type Small 벡터 opo, oop는 Sa2 스위치가 고장이 나더라도 부하전류(ian<0)를 클램핑 다이오드 D2를 통해서 흘릴 수 있으며 Medium 벡터 opn, onp는 Large 벡터(-pn, -np)처럼 동작하기 때문에 중성점 전압변동에 영향을 주지 않는다. 따라서 실제로 스위칭 소자 Sa2 고장 시 중성점 전압변동에 영향을 끼치는 스위칭 상태는 Small 벡터 ppo/onn, poo/onn, pop/ono 그리고 Medium 벡터 pon, pno 가 된다. 그림 4(b)는 Sa2 스위치 고장 시 중성점 전압변동을 나타내고 있다.

그림 4(c)와 4(d)는 각각 스위치 Sa3와 Sa4 고장 시의 전압변동 그래프를 나타내는데, 그 전압변동 양상이 Sa2와 Sa1 스위치 고장 시와 동일하게 나타난다.

3. 고장 허용 시스템

3.1 고장 허용 제어

일반적으로 스위칭 소자에서의 고장 발생 시 전체 인버터 시스템은 정지되어야만 한다. 그러나 만약 인버터 시스템이 높은 수준의 신뢰성을 요구하는 시스템에 적용되어진다면 고장 상황에서도 연속적인 운전이 보장되어야 한다. 본 논문에서 적용한 고장 허용 시스템은 기존 인버터 시스템의 각 상에 양방향 사이리스터를 추가한 형태로 이 스위치들은 고장 확인 후 인버터 회로를 재구성하기 위해 사용된다.^[4] 이 제어 방법에서 주목할 점은 고장 발생 후 재구성된 인버터 시스템이 연속적으로 평형 3상의 출력을 가능하게 하기 위해 상호 60도의 위상차를 가지는 두 개의 기준전압을 이용한다는 것이다. 이 제어 방법은 스위칭 소자의 고장 시 고장의 확산을 막고 연속적인 출력은 가능하나 기본과 최대 출력 전압이 고장 이전과 비교하여 $1/\sqrt{3}$ 배만큼 작아진다.

3.2 고장 검출 시간과 DC-link 커패시터 용량

고장 발생 시 인버터 전체 시스템에 끼치는 악영향을 최소화하기 위해서는 고장 검출이 빠르고 정확하게 진행되어야 한다. 만약 고장 검출 시간이 기준전압과 거의 한 주기 이상이 되면 고장 발생 전의 전압 변동과 같은 수준의 전압변동을 유지하기 위하여 커패시터의 용량이 증가되어야 한다. 그림 5는 고장 검출 시간과 커패시터 용량 사이의 관계를 나타내고 있다. 여기서 X축과 Y축은 각각 고장 검출 시간과 커패시터의 용량을 나타내며 f_{line} 은 출력주파수이다.

4. 시뮬레이션 결과

지금까지 살펴 본 중성점 전압변동에 관한 연구들을 검증하기 위해 PSIM 프로그램을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 조건은 $V_{dc}=200[V]$, $R=8[\Omega]$, $L=5[mH]$, DC-link 커패시터 $C=3000[\mu F]$, 변조지수(MI) : 0.533(고장 전), 0.9237(고장허용제어 시), 샘플링 시간 : $250[\mu s]$, 고장은 a상의 Sa2 스위치에서 발생하도록 하였다. 고장시점(t)은 300[msec] 이고 고장 허용 제어는 302 [msec] 에서 시작하였다. 그림 6(a)는 고장 전, 후의 기준전압을 나타낸다. 그림 6(b)는 고장 상에서의 부하전류를 나타내며 그림 6(c)는 중성점에서 중성점 전압변동에 직접적인 원인이 되는 중성점 전류를 나타낸다. 그리고 그림 6(d)는 이 중성점 전류와 같은 주파수로 변동하는 DC-link 커패시터 전압 V_{c1} , V_{c2} 를 보여준다.

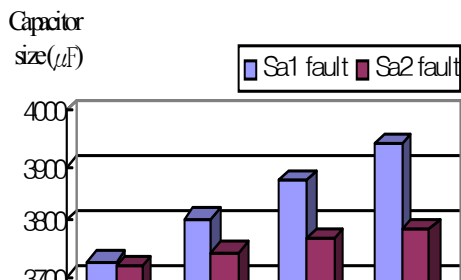


그림 5 고장 검출시간에 따른 커패시터 크기

Fig. 5 Capacitor size for each case of fault under different fault detection time, where f_{line} is line frequency

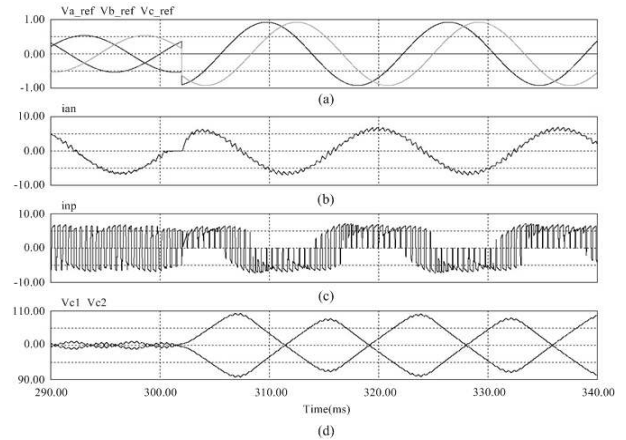


그림 6 고장발생시 파형(고장 발생 : 300[msec], 고장 허용 제어 시작 : 302[msec])

Fig. 6 Wave forms during fault condition(the fault occur at 300[msec], the fault tolerance control begins at 302[msec]) (a)transferred voltage references (b) load current i_{an} (c)neutral point current i_{np} (d)dc-link capacitor voltages

5. 결론

본 논문에서는 NPC 인버터 시스템의 중성점 전압변동 문제를 정상상태와 고장상태로 나누어 분석하였다. 특히, NPC 인버터 스위칭 소자의 개방성 고장 시 중성점 전압변동에 관한 연구는 높은 수준의 신뢰성을 요구하는 응용분야에서 고장허용제어가 적용되었을 때 시스템의 신뢰성을 확보할 수 있는 여러 정보를 제공하여 준다. 그리고 고장검출 시간과 고장허용제어 시 정상적인 NPC 인버터 시스템의 운전을 보장할 수 있는 DC-link 커패시터 용량과의 관계도 살펴보았다. PSIM 프로그램을 사용하여 이런 현상들을 검증 및 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, "A new neutral-point-clamped PWM inverter," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-17, no. 5, pp. 518-523, Sep./Oct. 1981.
- [2] N. Celanovic and D. Boroyevich, "A comprehensive study of neutral-point voltage balancing problem in three-level neutral-point-clamped voltage source PWM inverters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 15, no. 2, pp. 242-249, Mar. 2000.
- [3] R. L. de Araujo Riberio, C. B. Jacobina, E. R. C. da Silva, and A. M. N. Lima, "Fault-tolerant voltage-fed PWM inverter AC motor drive systems," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 51, no. 2, pp. 439-446, Apr. 2004.
- [4] 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 (IAS) Annu. Meeting, Seattle, USA, 2004, pp. 2188-2193.