# Markov 기법을 이용한 27-level 인버터의 고장률 분석

임성진[1], 강필순[1], 김태진[2]
경상국립대학교[1], 한국전기연구원[2]

# Failure rate analysis of 27-level inverter using Markov analysis

Seong Jin Lim[1], Feel-soon Kang[1], Tae-Jin Kim[2]
Gyeongsang National University[1], Korea Electrotechnology Research[2]

ABSTRACT

Cascade H-bridge 인버터는 다중 전압 레벨을 생성하여 dv/dt 스트레스를 줄이고 전력 변환시스템의 효율성과 안정성을 향상시킬 수 있지만 H-bridge 모듈의 부품 수 증가에 따른 고장률이 증가할 수 있다. 본 논문에서는 $3^n$(n=0, 1, 2)승비의 입력 전압원을 갖는 27-level 인버터의 신뢰성을 마코프 기법(Markov analysis)을 이용하여 분석한다. 출력 전압 파형의 THD(Total Harmonic distortion)가 10% 이상이거나 출력 전압의 진폭 변동이 20% 이상인 경우를 고장으로 정의하고 시간 경과에 따른 고장 변화 추이를 분석한다.

## 1. 서 론

계단식 H-bridge 멀티레벨 인버터(CHBMI)는 다중 전압 레벨을 생성하여 왜곡이 적은 AC 전압을 생성하여 사인파와 유사한 출력 파형을 생성할 수 있다. 이를 통해 dv/dt 스트레스가 감소하고 전력변환시스템의 효율성과 안정성이 향상된다. 또한 CHBMI는 다수의 다이오드나 콘덴서를 사용하지 않고 여러 개의 H-브리지 모듈로 구성되어 있어 시스템 비용을 절감할 수 있다. 따라서, CHBMI에 대한 연구 및 분석은 전력 전자 산업 발전에 필수적인 역할을 할 것으로 예상된다[1]. 그러나 CHBMI는 시스템 고장률을 증가시킬 수 있는 높은 THD, 고속 스위칭 손실 및 복잡한 제어 회로와 같은 구조적 문제를 가지고 있다. 따라서 CHBMI의 신뢰성을 비교 및 분석하는 것이 필수적이다[2]. 본 논문에서는 마코프 분석을 사용하여 입력 전압원이 $3^n$(n=0, 1, 2)인 27레벨 인버터를 분석한다. 고장의 정의는 출력 전압의 THD가 10% 이상이거나 출력 전압의 진폭 변동이 20% 이상인 경우로 하며 둘 중 하나라도 해당할 경우 시스템 고장으로 판단한다.

## 2. 27-level 인버터의 신뢰성 분석

### 2.1 27-level 인버터의 특징

그림 1은 $3^n$(n=0, 1, 2)승비의 입력 전압원을 갖는 H-bridge가 직렬로 연결된 구조를 보여준다. 각 H-bridge의 스위치가 담당하는 전력이 다르기 때문에 각 H-bridge의 고장률이 다르다. 27-level 인버터는 세 개의 H-bridge로만 구성되므로 크기가 작고 경제적인 장점이 있다. 그러나 레벨을 생성할 때마다 각 H-bridge가 출력해야 하는 값이 매번 바뀌기 때문에 한 개의 H-bridge만 고장 나도 여러 출력 전압 레벨이 무너져서 출력 전압의 THD가 크게 증가한다. 또한 각 H-bridge마다 인가 전압의 크기가 다르므로 어떤 브리지가 고장 나느냐에 따라 출력 전압 진폭 변동 값이 달라진다.

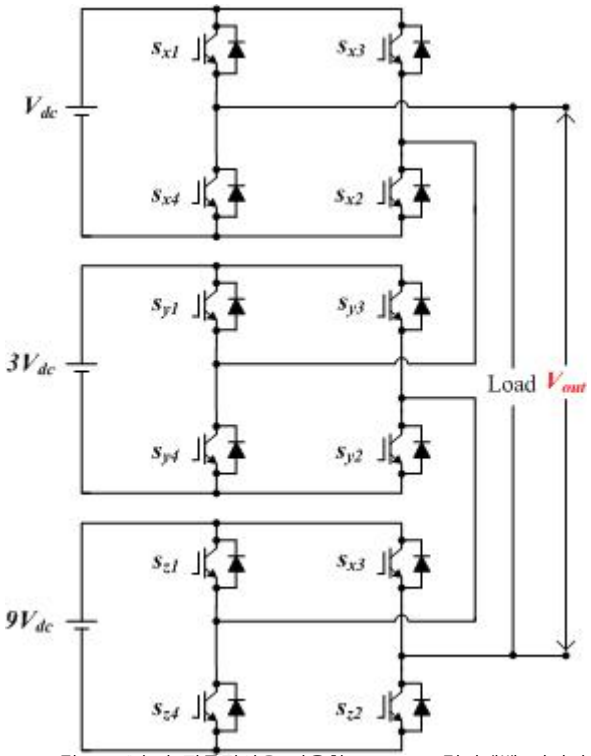


그림 1 $3^n$승비 직류전원을 이용한 H-bridge 멀티레벨 인버터의 구성

Fig. 1 Configuration of H-bridge multilevel inveter employing trinary dc sources

### 2.2 Markov 기법을 이용한 신뢰성 분석

마코프 분석은 시간 경과에 따른 고장 패턴의 변화를 모델링 한다. 상태전이의 조건은 인버터의 H-bridge가 고장 났을 때로 한다. 각 H-bridge의 고장률은 해당하는 H-bridge를 구성하는 네 개의 스위치 고장률에 대해 논리연산자 OR를 사용하여 계산한다. 부품의 기본 고장률은 MIL-HDBK-217F를 기준으로 하며 온도와 관련된 세부 사항은 인버터의 동작 온도를 고려하여 65℃를 기준으로 한다. 표 1은 정격전력에 따른 IGBT와 H-bridge의 고장률을 나타낸다.

표 1 정격전력에 따른 IGBT와 H-bridge의 고장률
Table 1 IGBT and H-bridge failure rate according to rated power

| H-bridge module | Rated Power [W] | $\lambda_{IGBT}$ [Failures/$10^4$hours] | $\lambda_{H-bridge}$ [Failures/$10^4$hours] |
|---|---|---|---|
| $V_{dc}$ | 1691.4 | 0.090714667 | 0.316402062 |
| $3V_{dc}$ | 5075.6 | 0.093554202 | 0.324901162 |
| $9V_{dc}$ | 15230.6 | 0.097818680 | 0.337514606 |

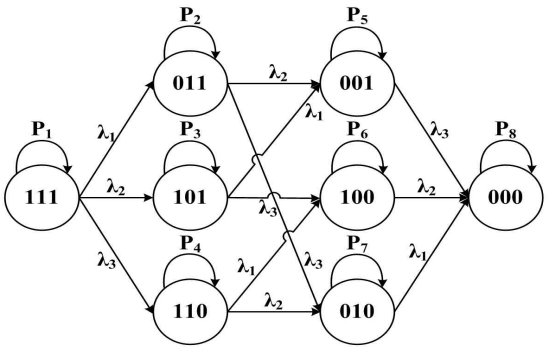


그림 2 상태전이 모델링
Fig. 2 A state transition modeling

표 2 H-bridge 고장에 따른 THD, 전압, 전압변동
Table 2 THD, output voltage and voltage fluctuation according to H-bridge failure

| | Normal | $V_{dc}$ H-bridge failure | $3V_{dc}$ H-bridge failure | $9V_{dc}$ H-bridge failure |
|---|---|---|---|---|
| THD [%] | 3.3387 | 9.00614 | 27.1083 | 138.955 |
| Output voltage [V] | 1555 | 1435 | 1196 | 478 |
| Voltage fluctuation [%] | 0 | 7.717 | 23.08 | 69.26 |

그림 2는 $\Delta t$ 시간 후 다른 상태로 전이될 확률의 관계를 모델링 한 것이다.

표 2는 각 H-bridge의 고장에 대한 THD, 출력 전압 및 전압 변동을 나타낸다. $V_{dc}$ H-bridge 모듈이 고장일 경우 THD가 10% 미만이고 전압 변동이 20% 미만이기 때문에 시스템 고장으로 보지 않는다. $3V_{dc}$ H-bridge가 고장일 경우 THD가 10% 이상이고 전압 변동이 20% 이상이기 때문에 시스템 고장으로 본다. $9V_{dc}$ H-bridge가 고장일 경우에도 마찬가지로 THD가 10% 이상이고 전압 변동이 20% 이상이므로 시스템 고장으로 본다. 이때 신뢰도는 식(1)과 같이 계산한다.

$$R(s) = 1-(P_3+P_4+P_5+P_6+P_7+P_8) = P_1+P_2 \quad (1)$$

$P_1$, $P_2$를 상태방정식으로 표현하면,

$$P_1(t+\Delta t) = [1-(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3)\Delta t]P_1(t) \quad (2)$$

$$P_2(t+\Delta t) = \lambda_1 P_1(t) + [1-(\lambda_2+\lambda_3)\Delta t]P_2(t) \quad (3)$$

$\Delta t$를 아주 작다고 가정하면 식(4), 식(5)와 같이 미분방정식으로 유도할 수 있다.

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = -(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3)P_1(t) \quad (4)$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_1 P_1(t) - (\lambda_2+\lambda_3)P_2(t) \quad (5)$$

초기값 $P_1(0)=1$, $P_2(0)=0$으로 가정하고 라플라스 변환하면,

$$P_1(s) = \frac{1}{s+(\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3)} \quad (6)$$

$$P_2(s) = \frac{\lambda_1 P_1(s)}{s+(\lambda_2+\lambda_3)} = \left(\frac{\lambda_1}{s+\lambda_2+\lambda_3}\right)\left(\frac{1}{s+\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3}\right) = \frac{1}{s+\lambda_2+\lambda_3} - \frac{1}{s+\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3} \quad (7)$$

$$R(s) = P_1(s)+P_2(s) = \frac{1}{s+\lambda_2+\lambda_3} \quad (8)$$

역 라플라스 변환을 통하여 신뢰도를 식(9)와 같이 구한다.

$$R(t) = e^{-(\lambda_2+\lambda_3)t} \quad (9)$$

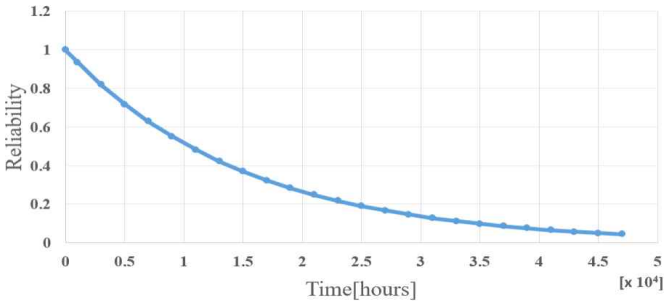


그림 3 마코프 기법을 이용한 27-level 인버터의 신뢰성 분석결과
Fig. 3 Reliability analysis result of 27-level inverter using Markov analysis

## 3. 결론

본 논문에서는 $3^n$(n=0, 1, 2)승비의 입력 전압원을 갖는 27-level 인버터의 신뢰성을 마코프 기법(Markov analysis)을 이용하여 분석하였다. 출력 전압 파형의 THD(Total Harmonic distortion)가 10% 이상이거나 출력 전압의 진폭 변동이 20% 이상인 경우를 고장으로 정의하고 시간 경과에 따른 고장 변화 추이를 분석한 결과 5000시간이 경과하면 신뢰도는 0.7으로 떨어지고 25000시간이 경과하면 신뢰도는 0.2이하로 떨어짐을 확인할 수 있다.


이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 자원을 받아 수행된 연구임 (20225500000120, 특고압 직류배전용 계측진단 및 신뢰성 평가 기술개발)


## 참 고 문 헌


[1] C.-C. Hua, C.-W. Wu and C.-W. Chuang, "Control of Low-Distortion 27-Level Cascade Inverter with Three H-Bridge Inverter Modules," 2006 IEEE International Conference on Industrial Technology, Mumbai, India, pp. 277-282, 2006.

[2] T. Lahlou, I. Bolvashenkov, H.-G. Herzog and A. Viatkin, "Comparative reliability analysis of a three phase five level cascaded H-bridge and H-bridge with level doubling network inverter topologies," 2018 Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte Carlo, Monaco, pp. 1-6, 2018.