

평균 스위치 모델링에 의한 인버터의 온라인 열화진단기법

박찬국, 최영길, 구태근
한국전기연구원

An on-line Deterioration Analysis Method of Inverters using Averaged Switch Modeling

Chan-Guk Park, Young-Gil Choi, Tae-Geun Koo
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - This paper presents an averaged switch model for an on-line deterioration analysis of inverters. The model is based on the operational characteristics of power diodes and IGBTs. Switching loss mechanisms are described and divided into the diode reverse-recovery mechanism, the IGBT current-tailing phenomenon, the IGBT turn-on time, and the output capacitances of the IGBTs and diodes. The deterioration analysis parameters are derived from the averaged switch modeling and the parameters can determinate the deterioration of the inverters.

1. 서 론

인버터는 전력변환장치로 산업기기 전반에 걸쳐 널리 이용되고 있으며, 다양한 제어기법과 전력용 반도체 소자의 발전으로 많은 기술적 진보가 이루어지고 있다. DC/AC 인버터는 가변전압 가변주파수 (VVVF) 제어용 인버터와 정전압 정주파수 (CVCF) 제어용 인버터로 대별되며, CVCF 제어용 인버터로써 무정전전원장치가 있다. VVVF 제어용 인버터는 가변속 회전력을 얻기 위한 유도전동기 등에 적용되며, 응용분야로는 전동차, 송풍기, 급속 가공기계, 차량구동 등이 있다. 현재 고효율화, 소프트 스위칭, 고역률화, 고밀도화, 소형화, 신뢰성 향상 등과 같은 성능 및 기능 향상에 많은 연구가 진행 중이며, 급속한 기술 발전이 이루어지고 있다.

산업현장에서 널리 사용되고 있는 인버터는 과전압, 과전류, 온도상승 등에 대한 이상 동작 시, 시스템의 파손을 방지하기 위한 자기진단 및 보호회로를 구성하고 있다. 하지만, 시스템에 장착된 전력용 반도체 소자는 사용기간이 경과할수록 또는 심한 stress를 받았을 경우 열화가 진행되지만, 그 열화의 정도를 현장에서 정확하게 파악할 수가 없으며, 이러한 전력용 반도체 소자의 열화는 시스템 전체의 이상동작과 효율을 저하시키는 요인이 되며, 갑작스런 소자이상으로 이어진다. 결국, 전력용 반도체 소자의 정기적인 열화진단으로 열화의 진행정도를 조기 점검함으로써 소자 파손으로 인한 설비 보수 및 설비 가동중단으로 인한 피해를 방지하기 위한 진단 기술이 필요하게 되었다.

본 논문은 인버터 주회로의 전력용 반도체 소자의 온라인 열화진단에 관한 것으로, 전력용 반도체 소자의 열화에 따른 전기적 특성변화를 관찰하고, 그 특성변화에 따라 소자의 열화정도를 기기의 동작 중에 용이하게 진단할 수 있는 방법에 관한 것이다. 일반적으로, 전기, 전자 분야에서 사용되는 전력용 반도체 소자의 특성

분석하는 방법 중에, 전력용 반도체 소자에 특정 전압을 인가한 후 이에 대한 반응전류의 상관관계를 통한 분석 방법으로 커브 트레이서(Curve Tracer)를 사용하는데, 이 방법을 이용하면 전압-전류의 특성곡선을 통해서 전력용 반도체 소자의 정상동작여부를 자세히 관측할 수 있지만, 진단 전압이 낮고 전류용량이 작으므로 전력용 반도체 소자의 실제사양에서의 측정은 불가능하므로 정확한 열화진단을 할 수 없는 단점이 있다.

본 논문에서는 전력용 반도체 소자의 열화에 따른 전기적 특성변화를 시스템의 운전상태에서 온라인으로 열화진단을 수행한다. 전력용 반도체 소자의 접합부 온도와 주변온도가 열적 평형 점에 다른 상태에서 전력용 반도체 소자로 구성되는 주 회로부의 입출력 전압 및 전류 값을 측정하고, 평균스위치 해석 모델을 이용하여 소자의 열화의 정도를 판단할 수 있는 파라메타를 계산하고, 이 파라메타의 변화추이로 열화의 진행정도 및 소자의 교체시기를 판단한다.

2. 본 론

2.1 스위칭 손실 메카니즘

스위칭 손실은 다이오드 역회복 메카니즘, IGBT current-tailing 현상, IGBT 턴 온 시간, IGBT와 다이오드의 출력 커패시턴스에 의해서 발생되며 다음과 같은 손실을 일으킨다. 다이오드 역회복에 의한 IGBT내에 유기된 에너지 손실, current tail에 기인한 IGBT 턴-오프 지연동안의 에너지 손실, 콜렉터 전류의 상승과 IGBT 턴-온 지연동안의 에너지 손실, 반도체 출력 커패시턴스에 의해 IGBT에 발생한 에너지 손실 등을 일으키고, 이들 스위칭 에너지 손실들의 합을 스위칭 주파수와 곱하면 평균 스위칭 파워 손실이 된다.

A. 다이오드 역회복

다이오드는 도통 시, 순방향 전류에 의존하는 소수 전하를 갖고 있다. 이 소수 전하는 다이오드가 역 바이어스 되기 전에 제거되어야 한다. 이 전하를 제거하는 두 가지 메카니즘이 있다: 다이오드 내부의 재결합을 통한 수동적인 방법과 반대의 다이오드 전류를 통해서 제거하는 능동적인 방법. 다시 재결합하는 전하량은 턴 오프 시 다이오드 전류의 변화율에 의존하고, 차례로 IGBT 턴 온 스위칭 스피드와 기생 인덕턴스 성분들에 의존한다. 남아있는 저장된 전하는 능동적으로 제거되어진다. 역회복 시간 동안에 반대전류가 다이오드를 통해 흐르고, 다이오드는 순방향 바이어스로 남아있고, 트랜지스터내의 순시 파워 손실은 매우 커진다.

B. IGBT CURRENT TAILING

IGBT는 MOSFET가 PNP BJT에 종속된 것처럼 모델링 할 수 있다. IGBT가 도통될 때, 전류의 일부분이 MOSFET를 통해 흐르고, 반면에 나머지 전류는 PNP BJT를 통하여 흐른다. 이 두 전류의 비는 디바이스 구조에 의해 결정된다. 턴 오프 변화 동안, MOSFET은 매우 빠르게 꺼지고, 따라서 온 상태 전류의 부담은 빠르게 차단되어진다. 그러나 PNP BJT의 전류는 n영역 내 저장된 소수 전하가 재결합 될 때까지 계속해서 흐른다. 따라서 current tailing은 IGBT 인버터의 가장 큰 단일 손실 메카니즘이다.

C. IGBT 턴-온 손실

IGBT 턴 온 시 콜렉터 전류의 상승시간 동안에 관찰된다. 이 기간 동안 게이트 드라이버는 IGBT 게이트 콘덴서를 충전한다. 전류가 클수록 많은 시간이 IGBT내의 PNP BJT에 소수 전하를 공급하기위해 필요하고, 더 나아가 턴 온 시간이 길어져 손실이 커진다. 따라서 턴 온 변화 동안의 손실은 작은 부하 전류와 고전압에서는 중요하지 않다.

D. 디바이스 출력 커패시턴스들

IGBT와 다이오드의 출력 커패시턴스는 비선형 소자이고, 그 증가치는 대략적으로 가해진 전압의 제곱근의 역으로 변한다. 이들 커패시터에 저장되는 에너지는 IGBT 턴 온 시에 IGBT내에서 소비된다. 각 인버터의 상은 두개의 IGBT와 두개의 다이오드를 포함하고, 각각 출력 커패시턴스를 가지고 있다. 위쪽 IGBT 턴 온시, 아래쪽 다이오드가 꺼지고, 역회복 과정을 거친다. 그러나 이 과정에서 위쪽 IGBT 및 다이오드의 출력 커패시턴스들에 저장된 에너지는 모두 소비된다. 인버터에서 이 손실은 dc-link 전압의 함수이며, 부하 전류의 크기와는 관계가 없다. 따라서 이 손실은 전체 전력용량과는 관계가 없고, dc-link 전압이 고정되면 일정하다.

MOSFET은 IGBT나 다이오드보다 더 높은 출력 커패시턴스를 보이는 경향이 있는데, 비슷한 정격 MOSFET가 상대적으로 넓은 칩 면적 때문이다. 결과적으로, 이 스위칭 손실은 IGBT를 내장한 인버터 보다 MOSFET을 내장한 인버터에서 더 크고, 특히 작은 부하 동작 조건에서 중요한 손실이 된다.

2.2 평균 스위칭 모델링

인버터는 전력변환을 위한 전력용 반도체 소자가 반드시 요구되며, 이들 전력용 반도체 소자는 사용시간이 경과함에 따라 열화가 진행되고, 이러한 열화는 시스템 전체의 이상동작과 효율을 저하시키는 요인이 되며, 결국, 소자파괴를 야기한다. 이러한 열화의 주된 요인의 변화추이를 관찰하면, 소자의 열화정도 및 교체시기를 판단할 수 있다.

전력변환을 위한 주요 소자인 IGBT는 MOSFET와 PNP BJT의 직렬 형태로 구성되며, 내부 구조상 역방향 다이오드가 내장되어있다. 일반적인 인버터에서 두개의 IGBT로 구성되는 하나의 Arm을 그림 1에 나타내었다. 열화에 영향을 미치는 전력용 반도체 소자의 손실은 도통손실과 스위칭 손실로 나타내며, 도통손실은 소자에 전류가 흐를 경우에 발생하는 손실로써 일반적으로 도통 전류의 제곱에 비례하여 나타난다. 스위칭 손실은

IGBT의 턴 온 및 턴 오프시에 발생하는 손실로써 IGBT의 턴 온시 역방향 다이오드의 역회복시 축적된 전하량에 따른 손실과 IGBT 턴 오프시 도통전류의 지연에 따른 손실로 나타낼 수 있다. 그림 2는 그림 1에서 위쪽 IGBT가 턴 온 되었을 경우의 위쪽 IGBT의 전압과 전류의 파형을 나타내며, 전압과 전류의 평균값은 식 (1)과 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

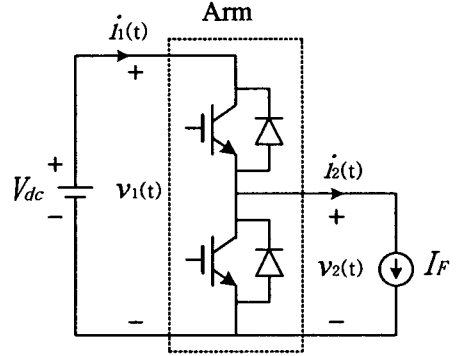


그림 1. IGBT 모듈 구성도.

Fig. 1. IGBT module configuration.

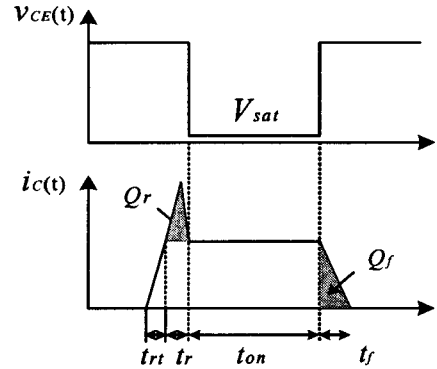


그림 2. IGBT 전압과 전류 파형.

Fig. 2. IGBT voltage and current waveforms.

$$[V_{ce}]_{T_s} = \frac{T_s - t_{on}}{T_s} (V_{dc} + V_D) + \frac{t_{on}}{T_s} V_{sat} \quad (1)$$

$$[i_c]_{T_s} = [i_1]_{T_s} = \frac{t_{on} + t_r + \frac{1}{2} t_{rt}}{T_s} I_F + \frac{Q_r + Q_f}{T_s} \quad (2)$$

여기서 T_s : 한 주기, $[Y]_{T_s}$: 한 주기 동안의 Y의 평균값, t_r : 역방향 다이오드의 역회복 시간, t_{rt} : IGBT 턴 온 시 전류의 상승시간, t_{on} : IGBT 턴 온 시 도통전류, V_{sat} : IGBT 순방향 전압강하, V_D : 다이오드 순방향 전압강하, Q_r : 역방향 다이오드의 역회복 시간 동안 축적된 전하량, Q_f : IGBT 턴 오프 시 도통전류의 지연시간 동안의 전하량을 나타낸다.

그림 1에서 Arm의 출력 단자전압은 식 (3)과 같이

나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 [V_2]_{T_s} &= V_{dc} - [V_{ce}]_{T_s} \\
 &= V_{dc} - \frac{T_s - t_{on}}{T_s} (V_{dc} + V_D) - \frac{t_{on}}{T_s} V_{sat} \quad (3)
 \end{aligned}$$

식 (2)와 (3)을 한주기 동안의 시비율 D 와 $D' = D - 1$ 로 표시하면 식 (4) 와 (5)로 나타낼 수 있다.

$$[V_2]_{T_s} = DV_{dc} - DV_{sat} - D'V_D \quad (4)$$

$$[i_1]_{T_s} = DI_F + \frac{t_r + \frac{1}{2}t_{rt}}{T_s} I_F + \frac{Q_r + Q_f}{T_s} \quad (5)$$

위의 식(4)와 (5)를 평균 스위치 모델로 나타내면 그림 3과 같다. 단, 식 (5)에서 $\frac{1}{2}t_{rt}$ 항은 너무 작으므로 평균 등가회로 모델에서 무시하였다.

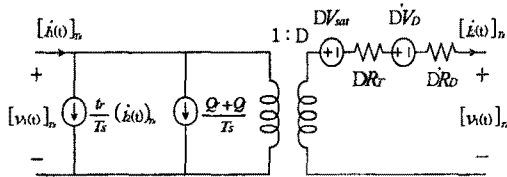


그림 3. 평균 스위치 모델.

Fig. 3. Averaged switch circuit model.

그림 3에서 1:D 변압기는 Arm의 입력측에서 출력측으로의 전력변환을 모델링 한 것이다. 그리고 역병렬 다이오드와 IGBT의 순방향 전압강하는 두개의 전압원 (DV_{sat} , $D'V_D$)과 두개의 등가 직렬저항(DR_T , DR_D)으로 모델할 수 있다.

IGBT의 스위칭 시간과 역병렬 다이오드에 축적된 전하량은 온도에 매우 민감하다. 그러므로 전력용 반도체의 접합부 온도와 주변온도가 평형 점에 다다른 상태에서 입출력의 전압과 전류 값을 측정하여 그 Arm의 평균 스위치 해석 모델을 통하여 도통손실의 등가직렬저항 값($DR_T + DR_D$)과 스위칭 손실의 다이오드 역회복 시간(t_r) 및 소자의 스위칭 전하량(Q_r , Q_f)을 알 수 있다. 이들 파라메타 값은 초기값은 전력용 반도체 소자의 제조업체 Data Sheet에 명시되어 있으며, 또한 실험을 통하여 DB를 확보할 수 있으므로, 이들 파라메타의 변화추이로 열화의 진행 정도와 소자의 교체시기를 판단할 수 있다.

그림 4는 본 발명에 따른 전력용 반도체소자 열화진단과정을 보이는 흐름도를 나타낸다.

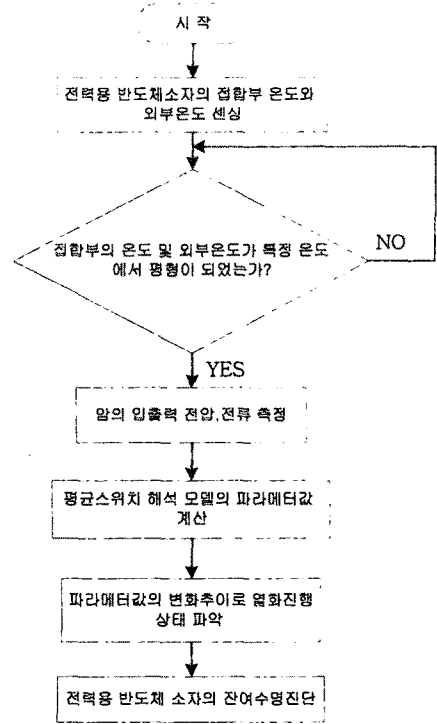


그림 4. 열화진단 흐름도.

Fig. 4. Flow chart of deterioration analysis.

3. 결 론

본 논문은 인버터의 전력용 반도체 소자 열화진단을 전력변환장치 동작 중에 자동으로 행하는 방법에 관한 것으로, 산업현장에 널리 사용되는 전력용 반도체 소자의 열화에 따른 전기적 특성변화를 관찰하고, 특성변화에 따라 소자의 열화정도를 용이하게 진단하여 소자파괴에 따른 사고를 미연에 방지할 수 있고, 나아가 적정 교체 및 보수시기를 결정할 수 있다.

[참고 문헌]

- [1] Muhammad H. Rashid, " Power Electronics ", Academic press.
- [2] O. A. Naseem, R. W. Erickson, and P. Carlin, " Prediction of Switching Loss Variations by Averaged Switch Modeling", APEC, Vol. 1, pp. 242-248, 2000