

# IPM을 이용한 Inverter 회로의 EMI 노이즈 저감에 관한 연구

하정준, 송복근, 차영길, 송현수, 조형섭  
인피니언 테크놀로지스 코리아(유)

## A study on the reduction of EMI noise in inverter circuits using an IPM

Jungjun Ha, Bokkeun Song, Younggil Cha, Hyunsoo Song, Hyoungsub Cho  
Infineon Technologies Korea Co.Ltd.,

### ABSTRACT

지능형 전원 모듈 IPM(Intelligent Power Module)은 모터 제어를 위한 최적의 전력 솔루션으로 가전분야 및 산업용에 많이 적용을 하고 있다. IPM은 소형화, 고효율, 고전력 밀도를 위한 기술 개발이 지속적으로 이루어지고 있으며, 특히 인버터 구동 스위칭 주파수가 높은 분야에서는 스위칭 온-오프 손실을 줄이기 위해서 빠른 dv/dt 특성을 요구된다. 이러한 특성은 스위칭 손실 측면에서는 유리하지만, EMI 특성에는 불리한 특성을 가질 수 있다. 스위칭 손실과 EMI의 최적 스위칭 조건을 설계하기 위해서는 게이트 저항값 변경을 통해 스위칭 특성을 변경할 수 있으나, IPM은 게이트 드라이버 IC와 게이트 저항이 IPM 내부에 고정되어 있어서 이를 쉽게 변경할 수가 없다. 따라서 dv/dt가 빠른 특성을 가지는 IPM을 사용할 경우, 인버터 시스템에서 EMI 노이즈는 증가할 수 있다.

본 논문에서는 IPM을 적용한 인버터 시스템에서의 EMI 노이즈를 개선하기 위한 방안을 제시하고자 한다. dv/dt에 의한 EMI 영향도와 시스템에서의 EMI를 개선하기 위한 방안으로 CM(Common Mode: 공통 모드) 초크 코어의 위치와 적용 방법에 대해서 제안하고 실험결과를 제시한다.

### 1. 서론

IPM은 빠른 dv/dt 특성으로 스위칭 손실을 줄이고, 시스템 전체의 효율 증가 및 IPM의 온도에 대한 신뢰성을 높이기 위한 경향을 가지고 있다. 그러나 시스템 레벨에서의 EMI 노이즈 증가로 해당 제품의 EMI 규격을 만족하기가 어려울 수 있다. 대부분의 시스템들은 교류 입력단에 EMI 필터 회로가 구성되어 있으나, 해당 제품의 EMI 규격을 만족 못하거나 또는 제품의 대량 생산을 통한 제품들의 편차를 고려하여 EMI 마진을 확보하기 위해서 추가적으로 시스템 레벨에서 CM 초크 코어를 적용하게 된다. 따라서 IPM의 스위칭 소자의 dv/dt 특성 차이에 의한 시스템에 미치는 EMI 영향도 분석하고, 시스템에서의 EMI를 개선하기 위한 CM 초크 코어의 적용 방법에 대해서 제안한다. 가전 분야에서의 세탁기 드럼 모터를 구동하기 위한 인버터단에 IPM을 적용한 시스템에서 실험을 진행하였다.

### 2. IPM의 dv/dt에 의한 EMI 영향도 분석

#### 2.1 시스템 구성

그림 1은 일반적인 세탁기 시스템에서의 메인 드럼 모터를 구동하기 위한 개략적인 블럭도이다. 교류 입력 전원은 EMI 필터 회로부와 브릿지 다이오드를 통해 정류된 전압을 이용하여 IPM을 통해 모터를 구동하게 된다.

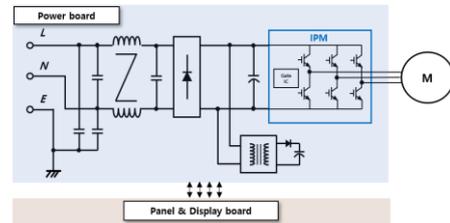


그림1 전형적인 세탁기 인버터 블럭도  
Fig.1 The typical washing machine block diagram

#### 2.2 IPM의 Low side IGBT dv/dt에 의한 EMI 영향

IPM 동작에 의한 세탁기 시스템의 EMI 영향도를 확인 하기 위해서 인피니언 IPM Tiny IPM IM323-L6G(600V/15A)를 적용하여 EMI를 측정하였다. 세탁기 시스템에서 EMI를 측정 하기 전 IPM의 IGBT 스위칭 특성인 dv/dt의 영향도를 비교하기 위해서 IPM의 U/V/W 출력단과 Low side IGBT의 컬렉터와 이미터단 사이에 커패시터 2nF 적용하여 스위칭 특성을 비교 시험을 하였다. 그림 2는 IPM 출력단에 630V 2nF MLCC 커패시터를 적용한 예이다.

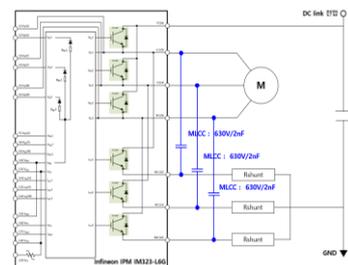


그림2 IPM U/V/W 출력단에 2nF 커패시터를 적용 회로  
Fig.2 The application circuit using 2nF capacitors at the U/V/W output

U/V/W 출력단에 MLCC 커패시터 2nF 적용 유무에 따른 IPM의 Low side IGBT 스위칭 dv/dt 및 스위칭 특성과 손실을 비교하기 위해서 더블 펄스 테스트(DPT : Double

Pulse Test)를 통해서 비교를 하였다.

표1 IPM low side IGBT의 dv/dt와 스위칭 손실 비교

Table1 dv/dt and switching loss comparison of IPM low side IGBT

DUT	Items	DPT : 6A @ Tc =25°C	
		Without MLCC	With MLCC 2nF
Low side turn on	Eon[uJ]	132.69	150.92
	di/dt[A/us]	240.00	241.20
	dv/dt[kV/us]	3.77	3.07
Low side turn off	Eoff[uJ]	64.94	190.12
	di/dt[A/us]	342.00	267.48
	dv/dt[kV/us]	6.66	1.95

표1의 시험 결과를 통해, 부하전류 6A 조건에서 더블 펄스 테스트를 통해 턴온과 턴오프 손실과 dv/dt 특성은 2nF를 적용한 조건이 MLCC 커패시터를 적용하지 않은 조건보다 dv/dt는 느려지게 되고 또한 스위칭 손실 또한 증가하게 된다. 그림 3과 그림 4는 U/V/W 출력단에 2nF 커패시터 적용 유무에 따른 세탁기 시스템 레벨에서 EMI 전도 노이즈(CE : Conducted Emission 측정)한 결과이다.

MLCC가 2nF이 적용되지 않은 조건에서는 dv/dt는 빠르기 때문에 EMI 노이즈 특성이 나빠지게 된다. 8.9MHz에서 CISPR average 규격 제한보다 2.1dB 높게 측정이 되었다. MCLL 2nF를 적용한 경우는 dv/dt를 느리게 하여 전영역에서 규격 제한치보다 낮게 측정이 되었으며 또한 MLCC 커패시터를 적용하지 않은 조건보다 낮은 전도 노이즈 특성을 가지게 된다.

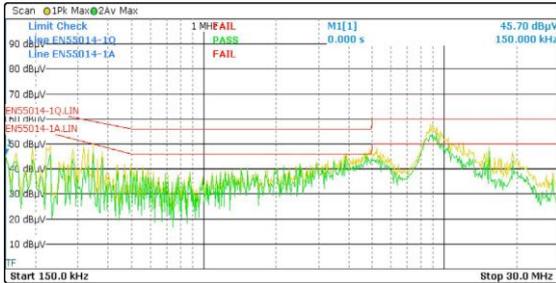


그림3 전도 노이즈 시험 결과 (2nF이 없는 경우)  
Fig.3 The Conducted Emission result (without 2nF)

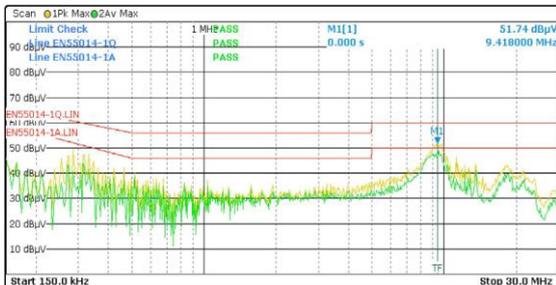


그림4 전도 노이즈 시험 결과 (2nF를 적용한 경우)  
Fig.4 The Conducted Emission result (with 2nF)

### 3. IPM의 dv/dt에 의한 H-field 분석

그림 5는 세탁기의 파워보드에서 IPM 동작시 발생하게 되는 자기장 노이즈를 측정하기 위해서 Near field probe인 H-Field probe(TBPS01-TBWA2)를 이용하였다.

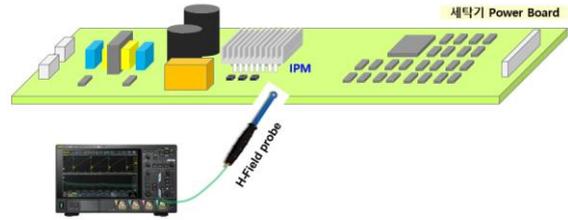


그림5 세탁기 파워보드의 IPM 주변 H-field 측정  
Fig.5 Measurement of H-field around IPM on the washing machine power board

적용된 IPM은 600V 5A이며, U/V/W 출력단에 MLCC 커패시터를 1nF을 적용한 경우와 적용하지 않은 조건일때 세탁기 초기 기동시 모터 정렬(align) 모드와 정상 구동 조건에서의 비교 시험을 하였다. 그림 6은 MLCC 커패시터를 적용하지 않은 조건에서 노이즈를 측정한 파형입니다.

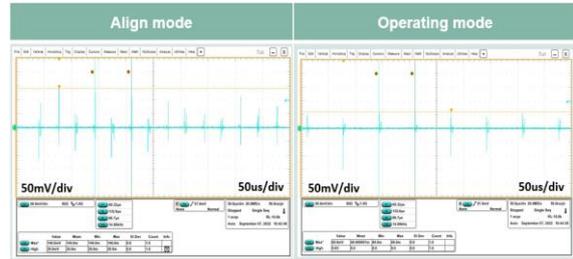


그림6 H-field 측정(1nF 없는 경우)  
Fig.6 Measurement of H-Field(without 1nF)

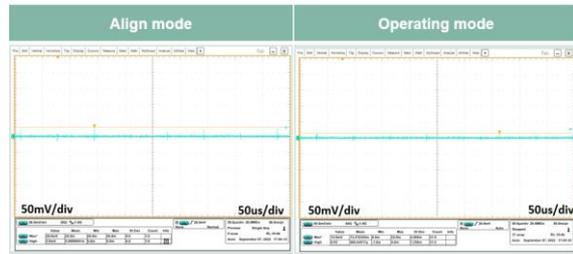


그림7 H-field 측정(1nF 적용한 경우)  
Fig.7 Measurement of H-Field(with 1nF)

그림 7은 U/V/W 출력단에 MLCC 1nF 적용하여 IPM 동작시 발생하는 자기장 노이즈를 측정하였다. 1nF을 적용한 조건에서 자기장의 방사되는 노이즈는 1nF을 적용하지 않은 조건보다 매우 낮은 방사 노이즈 특성을 가지고 있다. IPM의 스위칭 특성인 dv/dt가 빠른 경우에는, 시스템의 자기장 노이즈 및 EMI 특성은 나빠지게 되는 현상을 확인할 수 있다. EMI 특성을 개선하기 위해서는 IGBT의 스위칭 특성을 느리게 하기 위해서 U/V/W 출력단에 커패시터를 적용하는 것은 IPM의 온도 및 신뢰성이 낮아지게 되며 또한 시스템 효율도 나빠지게 되므로, 빠른 dv/dt 특성을 가지는 IPM을 사용시 시스템 레벨에서 추가적인 EMI 개선이 필요하게 된다.

### 4. CM 초크 코일 적용 방안

일반적인 인버터 시스템의 경우 EMI 규격을 만족하기 위해서

AC 입력단에 EMI 필터 회로를 구성할 하게 된다. 하지만 입력 EMI 필터로 EMI 규격을 만족하지 못할 경우, 또는 특정한 부분의 노이즈를 줄이기 위해서는 CM 초크 코어를 사용한다. 따라서 세탁기 시스템에서 CM 초크 코어의 적용 위치와 어떻게 적용할 것인지에 대한 방법을 제시 하고자 한다.

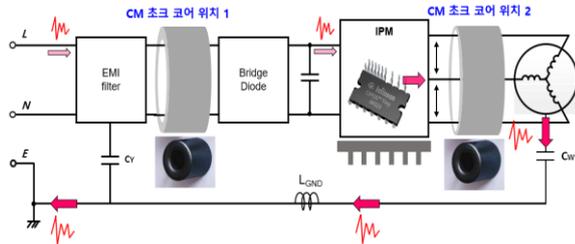


그림8 CM 초크 코어를 적용할 위치  
Fig.8 Position to apply CM choke core

그림 8은 CM 초크 코어를 EMI 필터 회로부의 출력단에 적용하는 경우와 또한 IPM의 출력단이 U/V/W 출력단 케이블에 적용을 할 수 있다. CM 초크 코어의 적용 위치에 대한 세탁기 시스템의 EMI 비교 분석하였다.

그림 9는 CM 초크 코어를 EMI 필터 출력단의 케이블에 적용하고, U/V/W 출력단에는 CM 초크 코어를 적용하지 않았다. EMI 측정 시험시에는 IPM은 600V/15A를 적용하였다. 그리고 그림 10은 CM 초크 코어를 EMI 필터 출력단에는 적용하지 않고 IPM 출력 U/V/W 케이블에 적용하여 EMI 전도 노이즈를 시험을 한 결과이다. CM 초크 코어 위치를 IPM U/V/W 출력단에 적용한 조건에서 EMI 전도 특성이 낮은 측정값을 가진다.

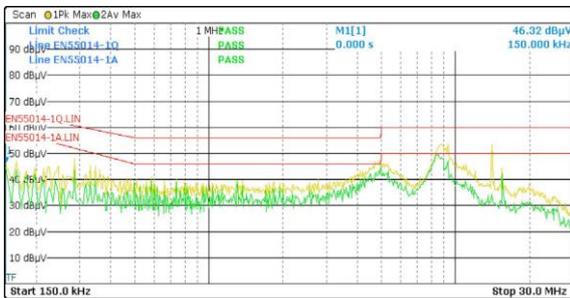


그림9 전도 노이즈 측정 : CM 초크 코어 적용 위치 1  
Fig.9 CE noise measurement : Position to apply CM choke core 1

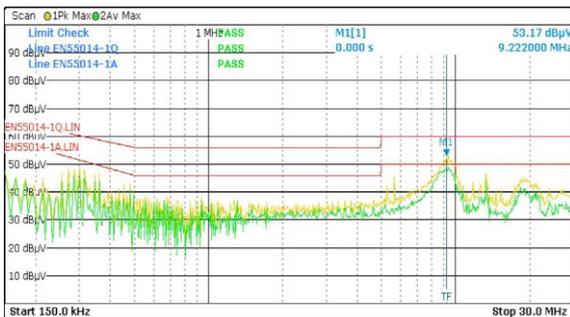


그림10 전도 노이즈 측정 : CM 초크 코어 적용 위치 2  
Fig.10 CE noise measurement : Position to apply CM choke core 2

시험 결과를 통해 IPM 동작 시 IGBT의 스위칭 통해

발생되는 CM 전도 노이즈를 줄이기 위해서는 U/V/W 출력단에 CM 초크 코어를 적용하는 것이 더 좋은 결과를 나타내고 있다.

그림 11은 CM 노이즈를 분석하기 위한 시스템 등가 회로이다. 여기서  $V_{CM}$ 은 이론적 해석을 위한 노이즈 소스원인 IPM의 출력단의 스위칭 특성을 의미하며, 이상적인 사각형의 펄스 전압으로 표현을 하였다. CM은 모터의 구조에 의한 등가 커패시턴스를 의미하며, 모터 내부의 권선간 그리고 권선과 접지와와의 기생 커패시턴스로 표현을 하였다.  $L_{GND}$ 는 접지와 AC 입력단의 접지간의 기생 인덕턴스이다.  $L_{CM}$ 은 별도로 CM 초크 코어를 사용하였다. 시스템 레벨에서 CM과  $L_{GND}$ 는 쉽게 변경이 어렵고 CM 노이즈를 줄이기 위해서 CM 초크코어 적용을 통해 CM 노이즈를 줄이기 위한 등가 회로이다.

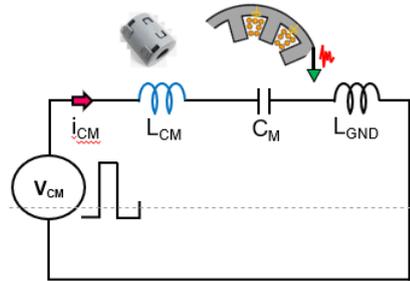


그림11 CM 노이즈 분석을 위한 등가회로  
Fig.11 Equivalent circuit for CM noise analysis

위의 등가회로에서 CM 노이즈 전류  $i_{CM}$ 는 CM 초크 코어의 인덕턴스에 의해 변경이 될 수 있다. 아래 수식은 등가회로에서  $i_{CM}$  전류와 특성 임피던스  $Z_o$ 을 유도할 수 있다.

$$i_{CM} = \frac{V_{CM} \cdot \sin \omega t}{Z_o} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{(L_{CM} + L_{GND}) \cdot C_M}} \quad (2)$$

$$L_{CM} \uparrow \Rightarrow Z_o \uparrow, i_{CM} \downarrow \quad (3)$$

따라서 특성 임피던스  $Z_o$ 값을 증가하게 되면  $i_{CM}$ 값을 줄일 수 있으며,  $Z_o$ 를 증가하기 위해서는 CM 초크 코어의 인덕턴스 증가가 필요하게 된다. 그림 12는 환상 솔레노이드 타입(Ring solenoid type)의 코어에 대한 인덕턴스 구하는 수식이다.

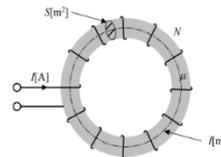


그림12 환상 솔레노이드 타입의 인덕턴스  
Fig.12 Inductance of ring solenoid type

인덕턴스를 증가하기 위해서는 CM 초크 코어의 투자율(Permeability,  $\mu$ )이 높은 코어를 적용할 수도 있으며, 또한 코어의 내부적으로 발생하게 되는 자기장의 길이(Magnetic path length,  $l$ )와 코어의 단면적(Cross sectional area,  $S$ )이 큰 코어를 적용할 수 있다. 하지만 이는 시스템 cost를 증가할 수 있기 때문에 인덕턴스를 증가 시키기

위해서는 코어에 턴수를 증가하는 것이 유리하다. 동일한 CM 초크 코어를 사용할 경우 CM 코어의 수를 증가하는 것과 턴수를 증가하였을 때의 인덕턴스 비교를 하였다. 동일한 코어 조건에서의 투자율, 단면적 그리고 코어의 자계의 길이는 동일하다.

$$K(\text{Constant factor}) = \frac{\mu S}{l} \quad (4)$$

$$L(\text{Inductance}) = KN^2 \quad (5)$$

코어의 턴수를 2T로 적용할 경우, 인덕턴스는 4K가 된다. 그리고 동일한 코어 조건에서 두개의 CM 초크 코어를 1T로 적용하여 직렬로 연결할 경우, 인덕턴스는 2K가 되므로, 인덕턴스를 높이고 시스템 Cost를 낮추기 위해서는 코어에 턴수를 증가하는 것이 유리할 수 있다.

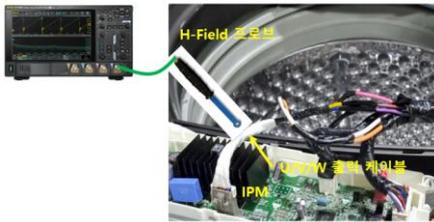


그림13 U/V/W 출력 케이블의 H-Field 측정 방법  
Fig.13 How to measure of H-Field at U/V/W output cable

그림13은 CM 초크 코어의 턴수 증가와 CM 초크 코어의 수를 증가하여 IPM의 동작시 U/V/W 출력단 케이블에서 방사되는 노이즈를 H-field 프로브를 이용하여 시스템 노이즈를 측정하였다.

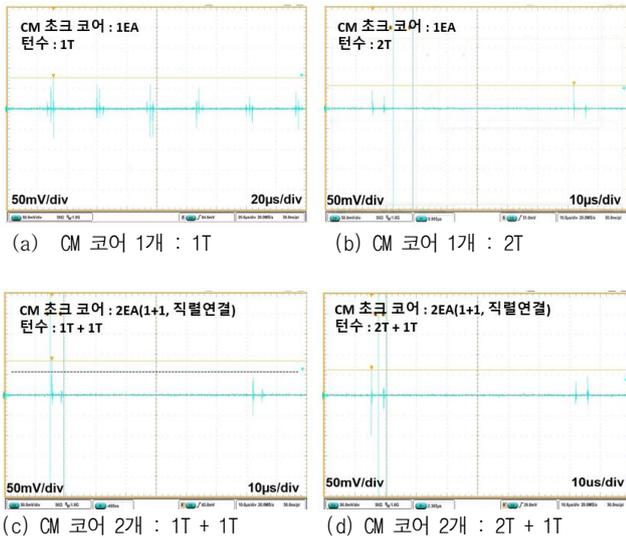


그림14 U/V/W 출력 케이블에 CM 코어를 적용한 H-Field 측정  
Fig.14 H-Field measurement with CM core of at U/V/W output cable

그림 14은 U/V/W 출력단 케이블에 자기장 노이즈를 측정된 결과이다. PM의 U/V/W 출력단에 CM 초크 코어를 1개 및 1턴을 적용하였을 때의 코어의 인덕턴스는 가장 낮으며, U/V/W 출력단 케이블에 방사되는 H-field 노이즈가 가장 높다. 턴수 2T를 적용하게 되면 인덕턴스가 증가하여 방사되는 노이즈

레벨은 줄어들게 된다. 동일한 타입의 CM 초크 코어를 2개 직렬로 각각 턴수를 1T로 적용하였을 경우, 하나의 코어에 2T를 적용한 것보다 인덕턴스가 낮기 때문에 방사되는 노이즈는 높게 측정 되었다. 또한 하나의 코어는 2T와 하나의 코어는 1T를 적용한 경우 가장 높은 인덕턴스 값을 가지게 되며 방사되는 노이즈 레벨 또한 가장 낮게 측정되었다.

## 5. 결론

IPM을 이용하는 인버터 시스템에서 IPM의 동작 시 dv/dt에 의한 CM 노이즈 특성이 시스템 EMI 특성에 미치는 영향을 세타기 시스템 레벨에서 분석하였다. 시스템에서의 IPM의 요구하는 특성은 빠른 스위칭 특성으로 IPM의 온도를 낮추어 시스템 전체의 신뢰성을 높이고 또한 시스템 효율을 높이기 위한 기술을 요구하고 있다. 하지만 EMI 를 개선하기 위해서 IPM의 스위칭 특성을 느리게 할 경우 IPM에 대한 요구사항을 만족할 수가 없다. 따라서 시스템레벨에서의 추가적인 EMI 개선 대책이 필요하며, CM 초크 코어를 적용을 통해 이를 해결할 수 있다. 본 논문에서는 CM 초크 코어의 적용 위치와 시스템 cost를 낮출 수 있는 코어 적용 방안에 대해서 시험을 통해서 타당성을 검토하였다.

향후 CM 초크 코어의 턴수에 대한 시스템 레벨에서의 EMI 측정 및 분석을 통해 EMI 전도 노이즈 저감에 대한 연구를 진행할 계획이다.

## 참고 문헌

- [1] 조수익, “주문형 IPM을 통한 Inverter 최적화 설계 및 Conducted EMI 노이즈 저감에 관한 연구”, 전력전자학술대회 논문집, pp.542-545, 2002 July 01.
- [2] 이건호, “전력전자 시스템에서 게이트 드라이버 IC의 Slew rate control을 이용한 스위칭 소자의 손실 및 EMI 특성 최적화”, 전력전자학술대회 논문집, 2022 July 07.
- [3] 이성희, “에어컨용 PFC Boost Converter의 전도 노이즈 저감”, 전력전자학술대회 논문집, 2003 July.
- [4] Yulin Zhong, Xuhui Wen, Peng Zhang, "Common-mode EMI problem & solution in designing an IPM", IEEE, 2011.
- [5] Minyu Cai, Tom Craddock, Oleg Wasynczuk, "High frequency modeling, parameterization, and simulation IPM motor derive systems", IEEE, 2017.
- [6] Curtis F. Gerald, Applied Numerical Analysis: Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. pp. 1-14, 1978.