

# High Frequency 방식 X선 고전압 발생장치에 관한 이론 및 실험

동아X선기계(주) 중앙연구소  
박 재 진

## The Experiment and Theory of High Frequency Generator for X-ray Equipment

Jai Jin Park

Research & Development Center, Dong-A X-ray Co., LTD.

### I. 서 론

최근 산업의 발전에 따른 다양한 전력 수요를 충족 시키기 위하여 전력용 반도체 소자의 개발과 inverter의 전력 변환 방식에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 inverter는 사용하고자 하는 장소와 목적에 따라서 변환방식, 전력용량, 변환주파수 및 전압이 결정되고 이에 적합한 전력용 반도체가 선정된다.

교류·직류간의 전력변환을 행하는 inverter(직류→교류) 방식과 converter(교류→직류) 방식의 기술이 대표적이다.

반도체 소자를 사용한 전력변환 기술인 power electronics의 응용으로는 다음과 같다.

(1) 전기철도 : 종래의 전기철도는 직류 MOTOR를 구동하였으나 최근에는 3상 유도모터를 inverter로 제어하는 기술이 사용되어 소형 경량화가 이루어졌다.

(2) 승강기 : 사무실의 고층화는 승강기 운전의 고속 성능과 효율적 운전을 필요로 하게 되어 중력감응을 고려한 상승, 강하에 inverter 기술이 사용된다.

(3) 인공위성 : 위성의 각종 통신·측정에는

많은 전원이 필요하며 특히 소형 경량이면서 고도의 신뢰성이 요구될 때는 회로소자가 작아지고 고주파화가 필연적이므로 공진형 inverter의 연구가 진행되고 있다.

(4) 가전기기 : aircon, 전자조리기, 형광등기구 등에 응용된다. aircon은 환경에 대한 효율적 운용목적으로, 전자조리기는 화기대용으로, 형광등 기구에는 무단(無段)조광조절기능 등으로 고부가가치 장치에 적용된다.

이상과 같은 산업응용에서 inverter는 무게와 부피를 줄이기 위한 방법으로 전력변환 주파수를 높여서 사용변압기의 크기와 필터회로의 크기를 줄여야 한다. 그러나 전력변환 주파수는 전력용 반도체 소자의 특성에 의존하므로 반도체 소자의 발전이 필수적이다. 최근 전력용 반도체 소자의 설계 및 제작기술의 발달로 고전압 대응량화, 고속화, 복합화로 전력 변환 분야에 많은 변화를 주고 있으며, 소형 경량화 하기 위해서는 고속 switching 특성을 갖는 대응량 전력용 반도체 소자가 요구된다. 이에 부응하여 MOSFET, IGBT, MOS-GTO 등의 소자가 개발되어 최근 inverter에 많이 사용되고 있다.

Inverter의 전력변환 방식으로 PWM(pulse

전력용 반도체 소자가 요구된다. 이에 부응하여 MOSFET, IGBT, MOS-GTO 등의 소자가 개발되어 최근 inverter에 많이 사용되고 있다.

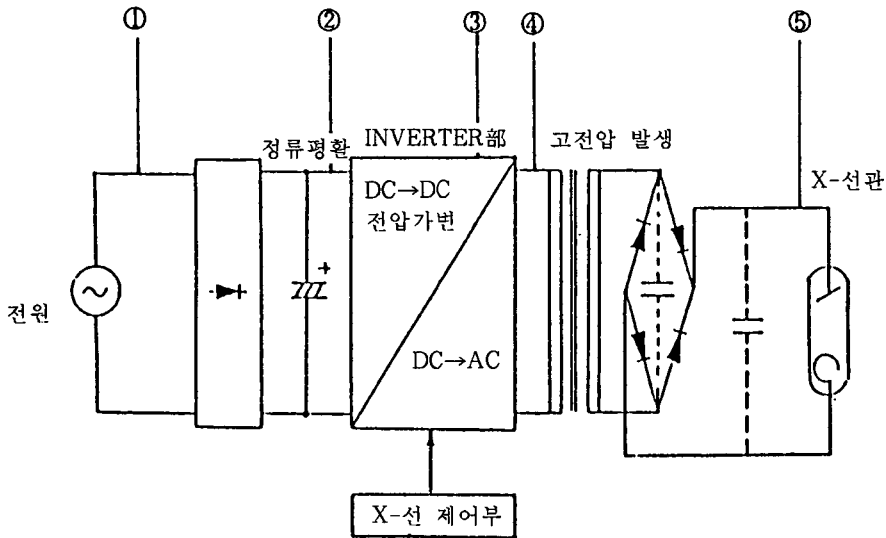
Inverter의 전력변환 방식으로 PWM(pulse width modulation) 방식을 사용한다.

X선 고압장치의 관전압 발생용으로 대략 최대출력 용량 30~60kW(150kVp, 600mA),

switching 주파수 20~100kHz인 High frequency, High voltage inverter가 사용되고 있다.

## II. INVERTER 구성 및 원리

### 1. System의 개요



a) 단상/3상의 상용전원을 정류평활부에서 평활정류를 하여 직류로 만든다.

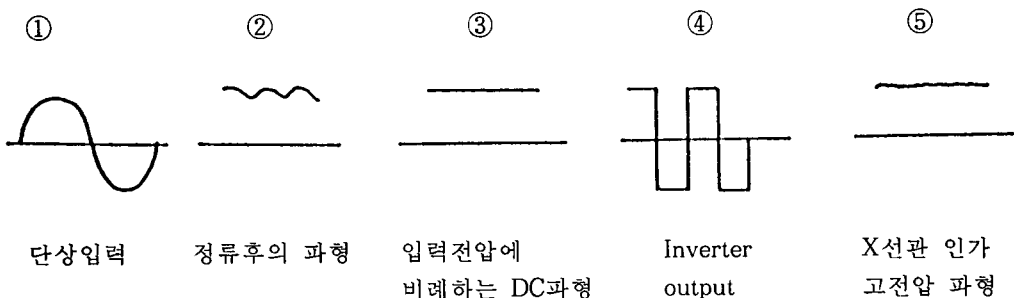
b) Inverter부에서는 소정의 관전압을 설정하여 전압가변제어를 실시하고 직류를 높은 주파수의 교류로 변환한다.

c) 교류로 변환된 전력은 고전압 발생부에서

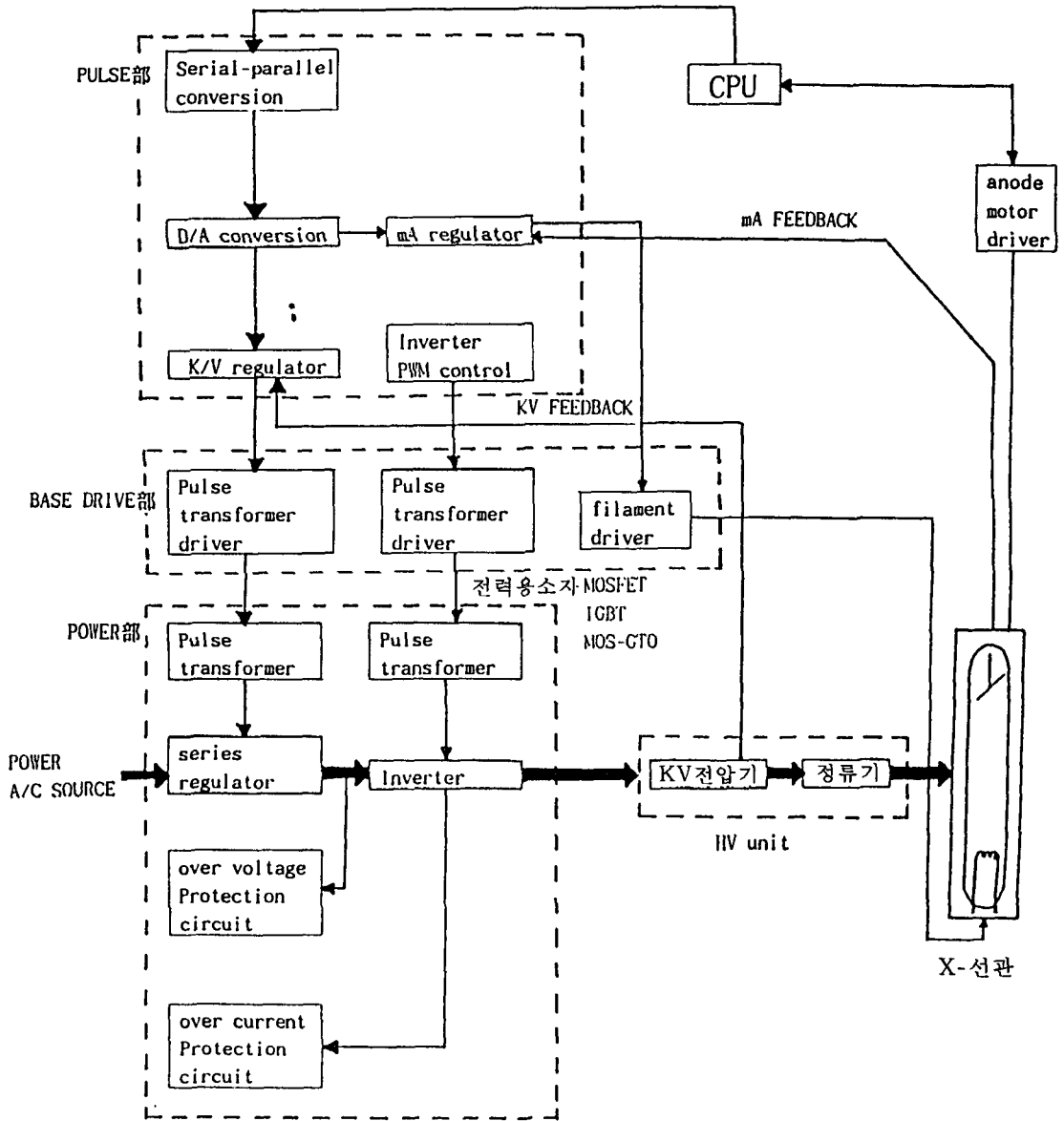
승압되고 정류되어 X선 발생에 필요한 직류 고전압으로 X-선관에 공급된다.

d) Inverter부의 출력 교류 고주파 pulse는 정류후 고전압 맥동전류를 얻게 된다.

블록별 파형의 변화는 다음과 같다.



상기 block diagram 및 파형은 개략적인 것 성은 다음과 같다.  
 이며 실제의 HFG(high frequency generator)구



각 부위별 동작은 다음과 같다.

1) **POWER(A/C SOURCE)** : System에 사용되는 교류전원의 공급부분으로 system에 필요한 모든 교류 및 logic 부분의 전원 power로써 과전압, 과전류 차단 기능 및 교류전원의 noise 차단 기능까지를 말하며 단상 및 3상 모두 사용가능하다.

2) **CPU** : 이 부분은 고주파 X-RAY generator에 연결되어 제어를 받는 모든 부분을 관장하는 micro-processor로써 I/O interface controller, timer, AD converter 및 제어 logic으로 구성되어 여기에 필요한 모든 장치들이 연결되어 동작을 수행한다.

3) **Rectifier** : AC source로부터 교류전력을 정류하여 맥류를 발생시키는 부분으로 semiconductor rectifier로 구성된다.

4) **Charge-condenser** : kVp를 발생시키는 안정된 전압원으로서 rectifier로부터의 맥류를 받아 고용량의 전해 콘덴서를 이용 평활하는 부분으로 양질의 DC전원을 만들어 H/T에 공급하기 위한 대용량의 capacitor로 구성된다.

5) **KVp-Controller** : 본 시스템에서 가장 중요한 부분으로 실제로 고주파의 교류를 발생시키며 발생된 고주파 교류는 H/T로 공급된다.

먼저 CPU로부터 해당되는 명령을 받아 수행되는데 해당되는 kVp는 DATA로 전달받아 해당되는 analog 값으로 변환되어 필요한 pulse 폭·양이 PWM controller에 전달되어 해당되는 고주파의 pulse열이 형성되고 solid-switch에 공급되어 고주파 교류전원이 발생된다.

6) **mA-controller** : kVp의 주파수가 동일 또는 높은 주파수를 갖는 PWM-control로, 구현방법은 kVp 발생기와 유사하며 발생된 고주파 전원이 H/T안의 filament용 transformer에

가해져 공간 열전류를 형성시킨다. PWM-control을 통하여 feed-back을 수행하여 CPU의 명령값을 자가보정한다. 즉 kVp의 주파수와 같거나 그 이상의 주파수로 동작하여야 성능을 보장받을 수 있도록 회로가 구성된다.

7) **Rotor controller(anode motor driver)** : Tube의 rotor를 제어하기 위한 부분으로 rotor의 Start, 정상회전 감시장치, rotor의 brake 장치들이 여기에 속한다.

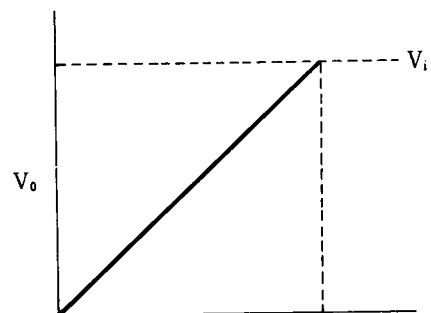
8) **High Voltage Transformer** : 저전압 고주파를 고전압 고주파로 승압하는 transformer로써 Tube의 음극을 가열하기 위한 trans도 내장하고 있다.

9) **Pulse부** : CPU로부터의 signal을 받아 kV generation을 start한다. 직병렬 변환기 및 Digital 신호를 analog 신호로 변환시킨다. 한편 CPU로부터의 kV 및 mA의 Reference를 설정한다.

10) **High voltage inverter** : HV inverter는 정류 평활된 전원을 X-ray tube를 구동할 수 있도록 변화시킨다. 항시 출력을 feed back하여 monitoring한다. 이러한 feed back system은 HV transformer 또는 X-ray tube cable의 이상 발견시 즉시 동작을 중지시킬 수 있다.

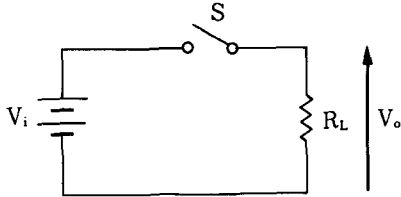
## 2. PWM(Pulse width modulation)제어방식

### 1) Step down converter

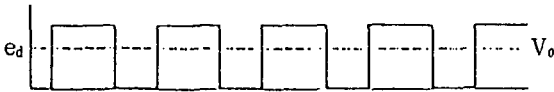


Down converter에서는 출력 전압은 입력전압보다 낮은 전압으로 변환된다. 이러한 출력 전압은 PWM을 조절하여 0에서 입력전압까지 조절할 수 있다.

아래 회로는 PWM을 설명하기 위한 가상적 회로이다.



스위치 S는 실제로 TR이거나 초당 천번 이상으로 개폐할 수 있는 soild-state 스위치이다. 여기에서 출력전압은 구형(square) 파형으로 되어 있다. 이와 같은 경우 출력전압은 반복되는 구간의 평균값  $e_d$ 을 취하게 되는데 이때 출력전압은 입력전압과, 통전된 시간에 비례할 것이다.



이것을 식으로 나타내면

$$V_{out} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} V_i \quad \text{① 식}$$

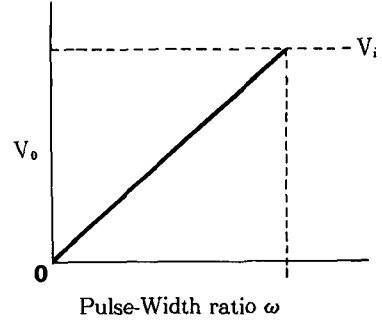
이때 우리는 다음과 같이 정의된 pulse width ratio  $\omega$ 라는 개념을 사용한다.

$$\omega = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad \text{② 식}$$

그렇게 되면 ①식은 다음과 같이 된다.

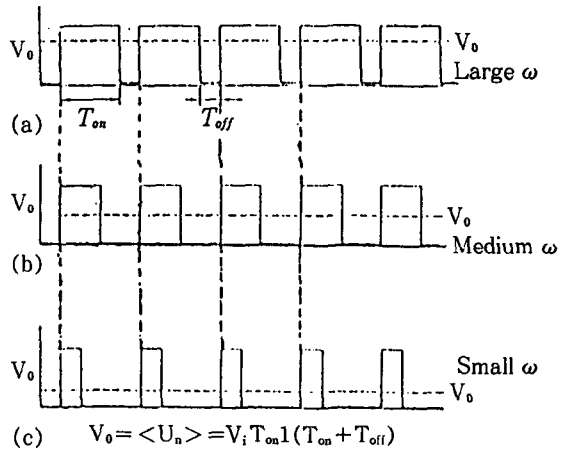
$$V_{out} = \omega V_i \quad \text{③ 식}$$

그림에서 보여준 것과 같이  $\omega$ 는 0에서 1까지의 값을 가지고 있다.



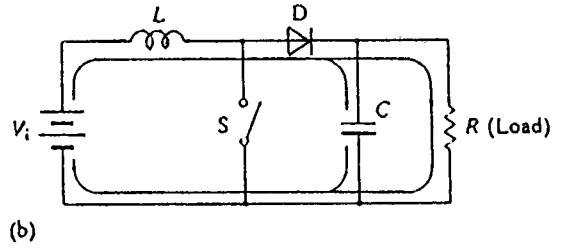
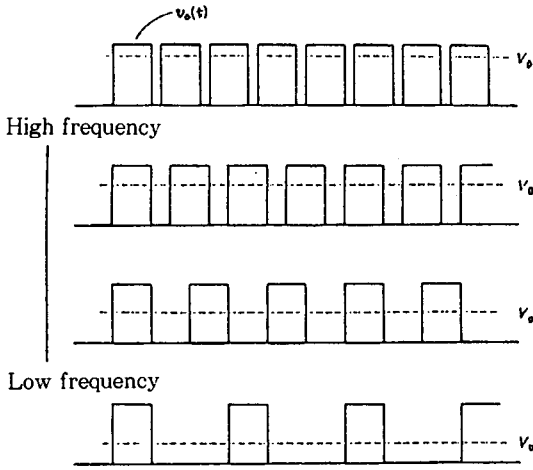
윗그림에서 보듯이 출력전압은  $\omega$ 에 비례하고 선형적으로 변하게 된다.

그림 (a)에서 (c)는 출력전압이  $\omega$ 에 의해 어떻게 변화하는지를 보여준다.



즉, pulse에서 ON되는 길이(width)를 조절(modulation)하여 전압을 조절하는 방식을 PWM방식이라고 한다.

또한 아래와 같이 주파수를 가변하여 출력전압을 조절할 수도 있다.



(b) 그림 (a)를 살펴보면 스위치가 ON 되어 있을 때 diode를 흐르는 전류  $I_D$ 는 0이다. 그리고 스위치가 OFF 되어 있는 그림 (b)를 살펴보면  $I_D$ 는  $I_i$ 과 같다.(여기서 콘덴서 C는 맥동전류를 평활하기 위한 것이다.)

$I_D=0$  Switch가 ON  $\rightarrow T_{on}$ 기간

$I_D=I_i$  Switch가 OFF  $\rightarrow T_{off}$ 기간

부하에 공급되는 출력전류는 스위치가 OFF 즉  $T_{off}$  기간동안 diode에 흐르는 전류뿐이므로  $T_{off}$ 에 비례한다.

$$I_o = \frac{T_{off}}{T_{on} + T_{off}} I_i \quad \text{--- ③ 식}$$

한주기 동안의 전력은 다음과 같다.

$$P_i = V_i I_i (T_{on} + T_{off}) \quad \text{--- ④ 식}$$

또 한주기 동안 부하에 공급되는 출력전력은 다음과 같다.

$$P_o = V_o I_o (T_{on} + T_{off}) \quad \text{--- ⑤ 식}$$

식 ③을 식 ⑤에 대입하면 식 ⑥을 얻을 수 있다.

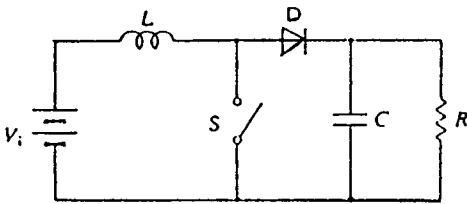
$$P_o = V_o I_i \frac{T_{off}}{T_{on} + T_{off}} (T_{on} + T_{off}) \\ = V_o I_i T_{off} \quad \text{--- ⑥ 식}$$

손실을 무시하여 입력전력  $P_i$ 와  $P_o$ 가 같다고 한다면 아래식을 얻는다.

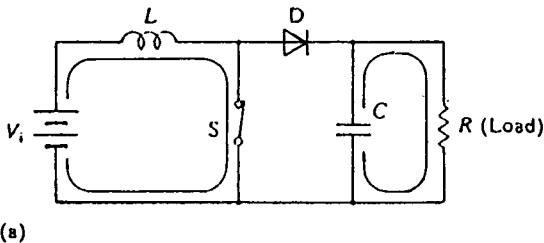
$$P_i = P_o \\ V_i I_i (T_{on} + T_{off}) = V_o I_i T_{off} \\ V_o = \frac{T_{on} + T_{off}}{T_{off}} V_i \quad \text{--- ⑦ 식}$$

## 2) Step up converter

PWM은 또한 전압상승 회로로써 사용할 수도 있다. 그림은 전압상승회로의 기본적인 형태를 나타낸다.



어떻게 출력전압이 입력전압보다 높은지 살펴보자.

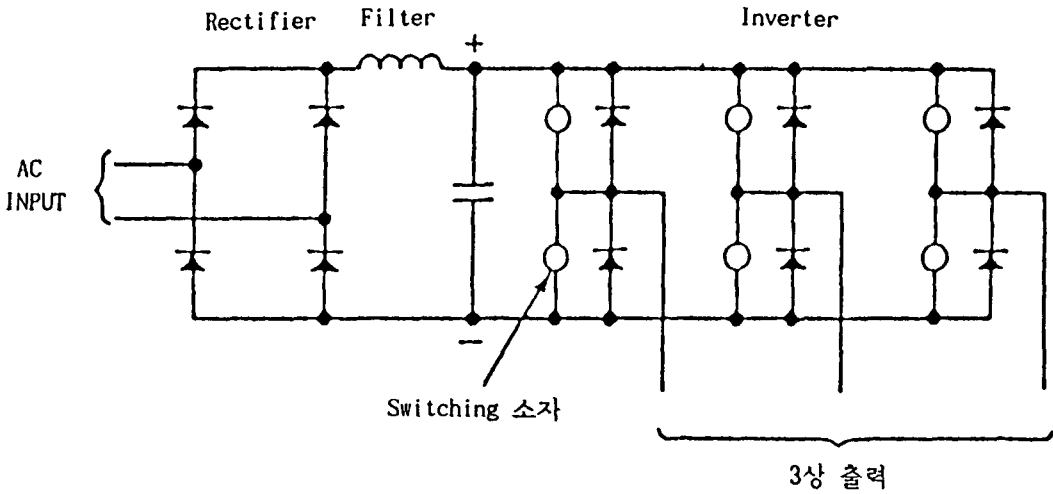


여기서  $\frac{T_{on} + T_{off}}{T_{off}}$  가 1보다 크므로  $V_o$ 가  $V_i$ 보다 크다는 것을 알 수 있다.  
 즉, 전압상승(승압)이 된 것이다.

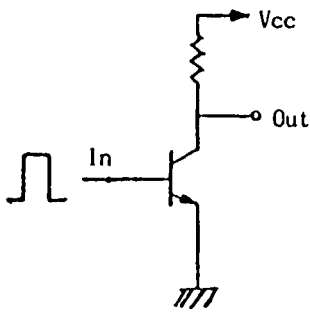
### 3. INVERTER 회로

#### 1) 인버터 회로

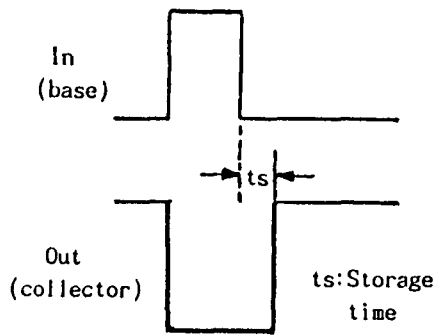
• Inverter의 구동회로는 두 가지 부분으로 구성되어 있어 첫째는 transistor에 의해 구성된 구성회로와 둘째는 구동변압기에 의한 구동회로이다.



• 고내압, 고속 switching transistor를 구동하는 경우는 power switching transistor를 완전히 포화시키고 storage time을 적게 하여야 한다.

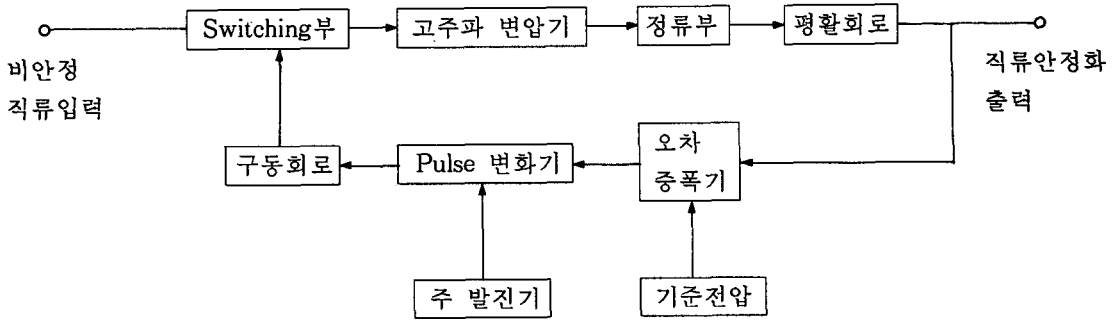


(a)



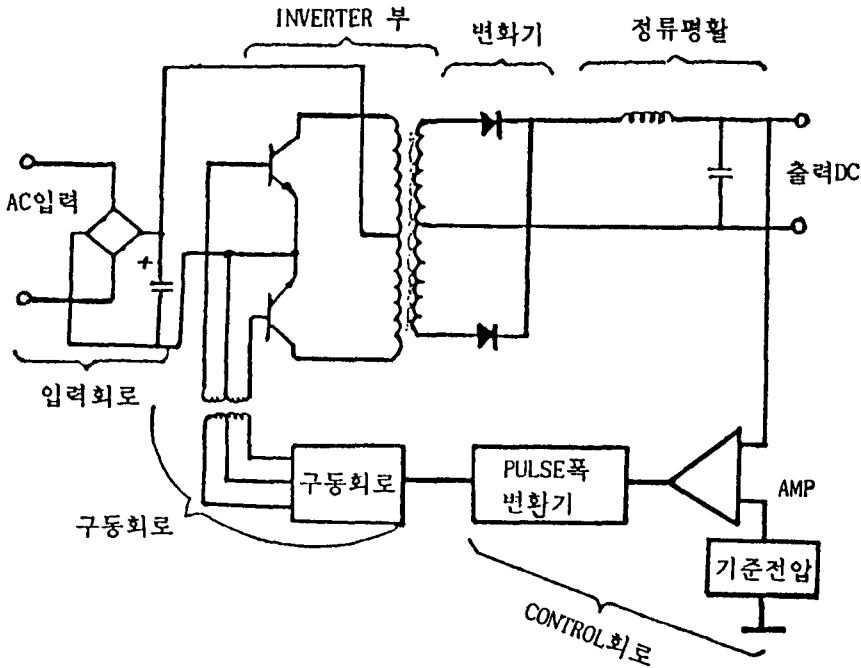
(b)

〈PWM 방식의 Inverter 회로의 기본구성〉



〈PWM 방식의 Inverter 회로〉

- 주파수는 고정되어 있지만 pulse폭을 가변 (ON시간을 가변) 하므로 출력을 제어한다.



- 펄스폭 제어 방식은 A/D 변환부에 등가적으로 pulse폭 변환회로를 이용한다.
- 동작주파수는 항상 일정하고  $T(=1/f)$  내의 ON 시간을 변화시켜 출력전압을 일정하게 유지시키는 방법이다. 따라서 출력의 부하가 크면 ON 부분의 pulse 폭을 크게 하고 반대로 부하가 작으면 ON pulse 폭을 좁게 하여 출력

전압을 일정하게 한다.

- Control 회로에는 오차증폭기, 신호 변환회로, 발진회로(자력방식일 경우는 갖고 있지 않다.)가 있고 driver 회로는 power switching transistor를 구동하고 고내압 고속 Switching 부를 inverter부라고 한다.



## 2) Inverter 회로의 동작원리

입력회로에 입력된 교류입력은 직접정류를 시켜 평활회로를 거쳐 평활된다. 평활된 직류 전압이 Inverter부(switching)회로의 bias전원이 된다. 이 bias 전원은 inverter부의 switching transistor의 switching에 의해 고주파(20 kHz 이상)로 변환되며 pulse 변압기를 통해 2차측의 정류부에 전달된다.

정류부에서는 이 고주파 교류를 recovery time이 빠른 정류 diode로써 정류하고 filter부를 통해 ripple이 적은 직류전압으로 만들어 부하에 공급한다.

출력을 안정화하는 방법은 출력단에 오차감지 증폭기의 입력을 접속시켜 항상 출력을 감지한다. 이 증폭기는 출력전압과 기준전압을 비교하고 오차량을 검출후 증폭한다. 증폭된 오차신호는 control회로의 pulse폭 변환기에 보내져 제어신호가 된다. 이런 변환기는 고정주파수 발진기로서 동작한다. 구동회로에 의해 구동된 inverter부의 switching transistor는 제어 신호에 의해 출력을 제어하고 안정화를 도모한다.

## 4. SWITCHING 소자

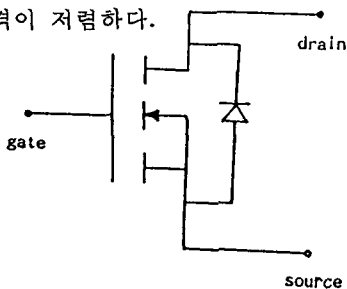
### 1) MOSFET(HEXFET)

(: Metal-oxide semiconductor field effect TR)

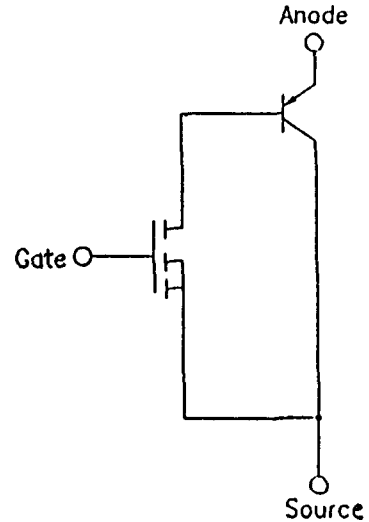
• 고주파 PWM inverter의 장점은 수십 kW의 출력을 cover할 수 있고 낮은 출력왜곡, 높은 과부하 능력, 빠른 응답 및 간단한 회로 구성을 할 수 있다.

• Speed가 빨라 가청주파수 범위를 넘는 switching 주파수 사용이 가능하다.

• 가격이 저렴하다.



### 2) IGBT(insulated gate bipolar transistor)



• 주파수 대역(standard, fast, ultra fast)에 대응하여 특히 10 kHz~100 kHz에서 switching loss를 최소화할 수 있고 cost 및 성능에서 유연하고 효과있게 사용할 수 있다.

• 동작 전류에 있어서는 특히 PWM 구동회로와 같은 경우 동작온도, duty cycle, power 손실 등에 그 성능이 적용된다.

### 3) MOS-GTO(gate turn off switch)

• Mosfet의 고속 스위칭 특성과 GTO thyristor의 고전압 대전류 용량을 갖는 switching 소자이다. 구조적으로는 GTO와 mosfet가 hybrid model로 제작되어 있다.

• GTO와 mosfet가 직렬로 연결되어 있어 ON 전압이 증가, 손실이 증대될 우려가 있으나 복합소자로 구성되어 ON전압은 IGBT와 유사하다.

• 고전압 대전류 소자이다.

IGBT < MOS-GTO < GTO

• 고속작동이 가능하며 switching 손실이 적다.

• SCR 일단 도통하면 anode 전압을 0 또는 0에 가깝게 하여 그 유지 전류 이하로 하지 않으면 차단(off)이 되지 않는다. GTO는 SCR보다 게이트 제어 능력을 크게 하여 turn off하기 쉽도록 그림과 같이 gate를 수개소로 분할해

좋은 소자이다. 일단 OFF상태가 되면 SCR과 마찬가지로 gate에 순방향 전압을 공급해 주지 않는한 OFF상태를 계속 유지한다.

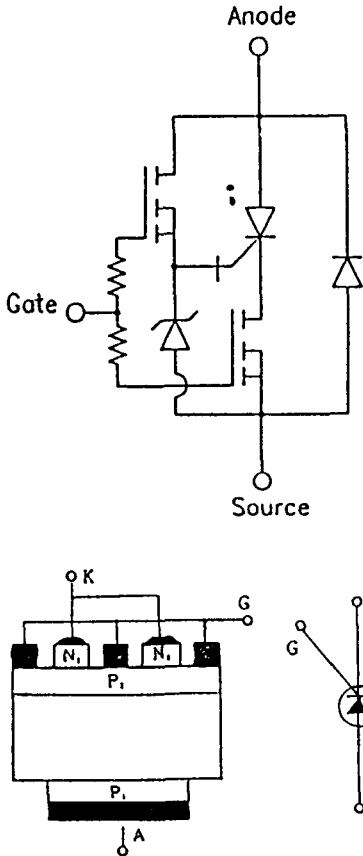


그림 2.22 GTO의 구조와 심법

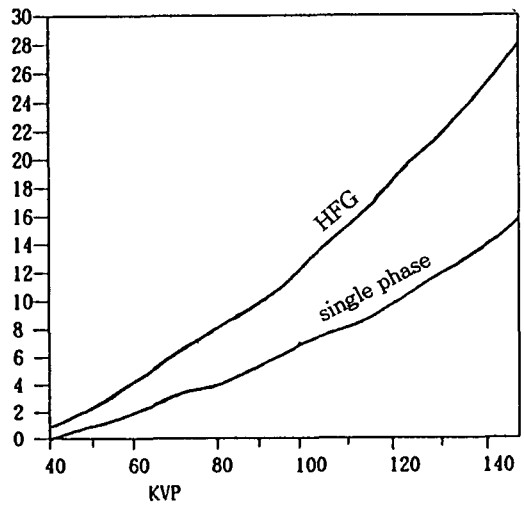
### Ⅲ. 고주파 inverter 방식과 기존의 방식의 특성 비교 및 실험

고주파에서 생성되는 출력은 최소의 ripple을 발생시킨다. ripple이 낮을수록 출력이 constant potential에 더욱 가까워진다. 이런 고에너지는 mAs당 더욱 큰 mR을 생성할 수 있도록 효과적으로 X-ray tube를 운용한다.

촬영시간과 환자에게 조사되는 방사선의 량을 감소시키고 또한 계속적인 선명한 image 및 명암대비를 제공하므로 이러한 요소들을 증대시킨 고주파 방식이야말로 X-ray 장치의 운용을 매우 효과적으로 만든다.

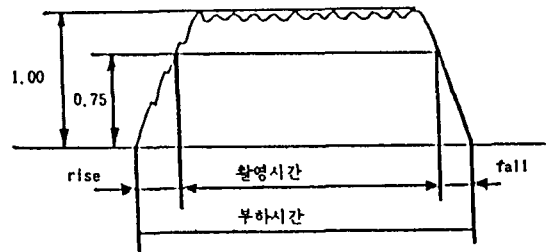
항목 \ 형식	단 상	3 상	Inverter
체적, 중량	×	△	○
가격	⊙	△	△
X선 출력	×	△	△
재현성, 직선성	×	△	○
단시간 촬영	×	△	○
촬영시간 감소	×	△	○

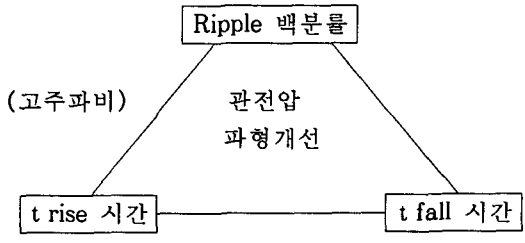
〈mR/mAs 비교도〉



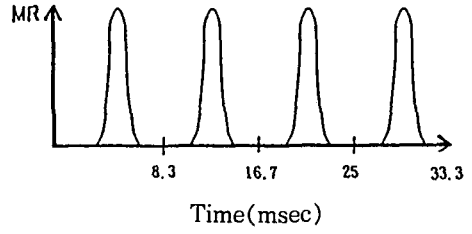
Wave form의 비교(100 kV/500 mA)

	3상 12peak	Inverter
rise time(ms)	3	1
fall time(ms)	4	2
Ripple (%)	3~5	10



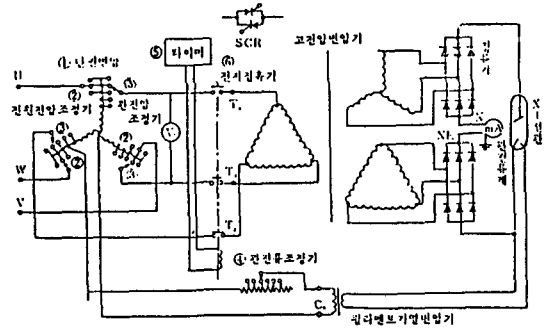
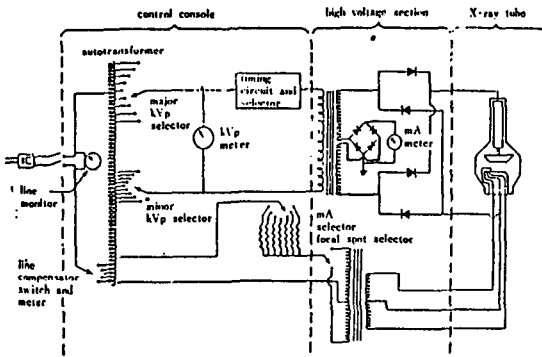


(1차평활소용량화) (2차강제차단방식)



## 2) 3상 12 peak 전파 정류장치

### 1) 단상 전파 정류형



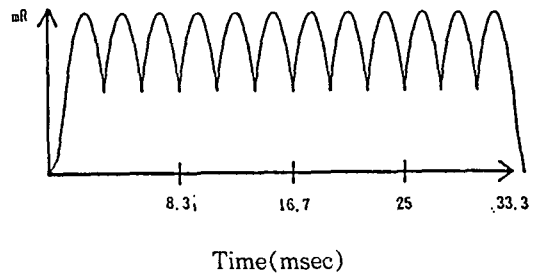
• 단상으로된 장비는 mAs 출력에 대한 mR이 낮기 때문에 촬영시간이 길고 필름 교환이 어렵다. 왜냐하면 X-ray 에너지는 출력의 과동의 끝 즉 최고점에 도달했을 때만 생성되기 때문에 침투 방사선은 매우 비효율적으로 생성되며 많은 부분이 2류의 방사선으로 낭비된다.

이런 비효율적인 방사선 생성은 긴 촬영시간이 필요하므로 자발적이든 비자발적이든 필름에서의 환자의 움직임이 증가하게 되고, 비효율적인 방사선으로 필름에 fog가 끼게 되어 image를 부정확하게 한다.

• 단상에 의한 또다른 문제는 X-ray tube 양극이 쉽게 퇴화하는 것이다. Constant potential에 비해 pulse power는 양극의 pitting과 tube의 수명을 감소시키는 hot spot을 발생시킨다.

• 3상 Power는 초당 360pulse를 생성하면서  $\frac{1}{3}$  주파수까지 서로 조화되지 않는 3가지 단상 전류로 구성되어 있다. 물론 3상 generator는 단상보다 더욱 효율적인 X-ray 출력을 생성하고 있다.

• 단상에 비해 더욱 개선을 하더라도 18% kVp와 50% mR ripple 정도이기 때문에 kV 과형에서의 비효율성은 여전히 발생한다. 제작에서의 비용의 증가도 무시할 수 없다.



### 3) 고주파 generator

• 성능이 우수한 단상장비와 비용이 많이 드는 3상장비 사이의 차이를 메우기 위해 1970 년대에 고주파 generator가 개발되었고 초기에는 비싸고 큰 장소에서 수용가능했으나 현재로서는 소형, 경량에 실용적인 가격으로 우수한 image film을 얻게 되었다.

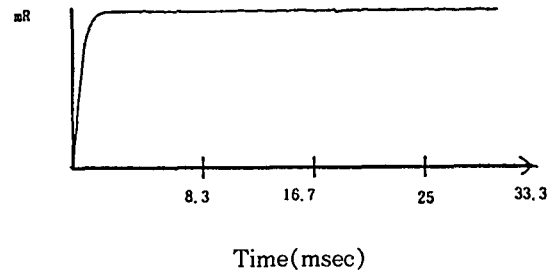
• 가장 높은 kV에서 가장 낮은 mA와 가장 낮은 kV에서 가장 높은 mA를 만드는 constant power 출력 기술이 연구되었다. 이에 따라 모든 기술을 최선화하고 정확한 촬영을 할 수 있는 최고의 kV에서의 최고 mA와 유연성 그리고 program할 수 있는 능력이 뒤따르게 되어 이를 충족시키기 위한 고주파출력은 가장 훌륭한 진단 image를 창출하게 되었다.

• 고주파 generator에서 생성된 mR과형은 불규칙한 ripple과 느린 rise와 fall time을 배제하고 빠른 rise와 fall time, 그리고 거의 평평한

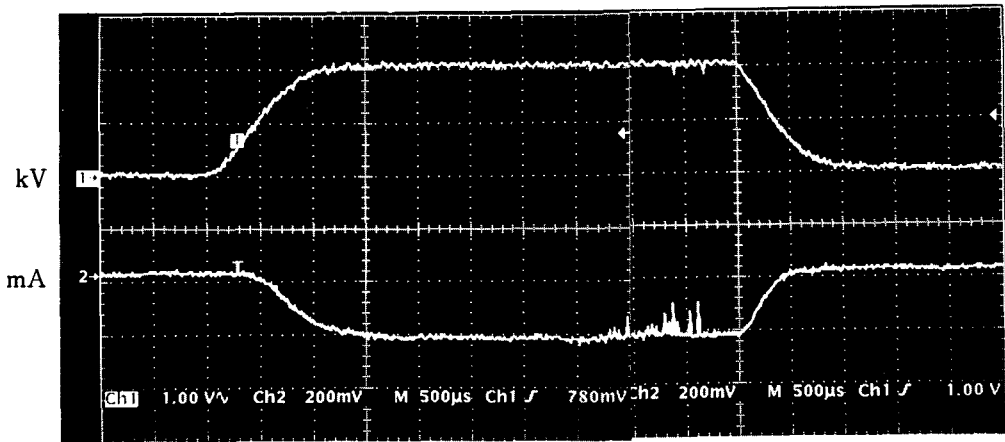
wave와 계속되는 mR 출력을 갖는다.

• Constant potential 출력의 장점으로서 100mA 이상의 tube 전류로 1 kV(1%이하)의 ripple을 생성한다.

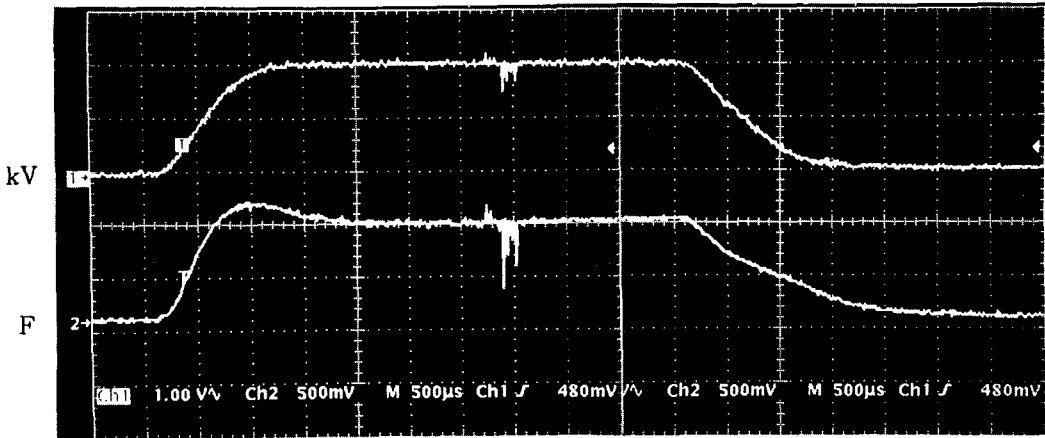
Ripple이 작을수록 정확도가 높고 촬영시간이 짧으며 단상장비보다 보통 26% 더 낮은 방사선량이 환자에게 조사된다. 더욱 높은 power는 더욱 효과적인 침투 X-ray를 생성해 image 명암이 뚜렷하게 되며 촬영시간이 더 짧은 경우는 tube의 수명을 연장시켜 준다.



Inverter



70kV 100mA 0.005sec



70kV 100mA 0.005sec

## VI. 결 론

이상과 같이 기존, 단상 3상 방식과 고주파를 이용한 inverter 방식의 X선 고압 발생장치에 대한 이론을 비교 설명하였다. 이러한 비교 검토를 분석한 결과 다음과 같은 우수한 특성과 효과를 가지고 있다는 것을 알 수가 있다.

- a) Ripple이 적은 이상적 정전압 파형이 얻어진다.
- b) 1.6~2.0배 X선 출력선량이 증대된다.
- c) 선질의 변화가 없고 형광량과 mAs값의 직선성이 얻어진다.
- d) Feed back 제어에 의해 변동계수가 0.01 이하의 우수한 재현성이 구현된다.
- e) 조사시간에서 1ms 이상의 단축, 조사용담 시간 set up시간 등 촬영에 필요한 시간에서 빠른 대응이 이루어진다.

f) 피폭선량이 줄어든다.

g) 소형 경량화를 이루어 휴대용 촬영장치의 개발이 가능해졌다.

h) 연간 0.4건 이하의 낮은 고장률 및 자가진단 기능 보유로 down time의 단축이 가능해졌다.

앞으로 고주파 inverter의 발전은 switching 소자의 개발과 transformer, EMI noise 감소에 더욱 연구되리라 생각되며 이에 맞추어 100 kHz 이상의 것도 출현 가능하리라 믿는다.

X선 고압발생 장치로서 고주파 inverter 장치는 현저한 피폭량 감소, image 선예도의 증가 저렴한 가격 등으로 앞으로의 대체 장치로써 실용화 될 것이며 방사선 진단에 무한한 기여를 하리라 믿어진다. 또한 출력전압이 안정되고 고출력을 얻기 위하여 시스템 제어제와 변압기의 고주파 특성에 많은 연구가 있어야 할 것으로 판단된다.