

論文96-33B-12-13

37.5kVA급 고주파 공진형 인버터식 진단 X선 전원장치

(A 37.5kVA Class Power Supply for Diagnostic X-ray by High-Frequency Resonant Inverter Type)

金學成*, 爾東旭*, 林根熙*, 元忠淵**

(Hack-Seong Kim, Dong-Wook Yoo, Guen-Hie Rim, and Chung-Yeon Won)

要 約

본 논문은 37.5kVA(125kVp, 300mA)급으로 두 가지 형태의 절연형 고주파 변압기를 사용한 고주파 공진형 인버터식 진단 X선 전원장치를 소개하였다. 본 전원장치는 두 개의 고주파 구동 인버터를 사용하여 PI 제어기를 통한 피드백제어를 행함으로써 출력인 X선관전압과 관전류를 조절하고 타임 스위치에 의해 X선 발생 시간을 선택하고 각 장치들을 동기시켜 동작토록 구성하였다. 논문에서는 제시된 전원장치의 동작모드와 설계 시 고려 사항들을 언급하고 본 장치의 핵심부인 고전압을 발생시키는 고주파 고전압 절연형 변압기의 설계와 필라멘트 가열에 주안점을 두었다. 본 장치는 관전압의 빠른 상승과 재어의 정밀성, 장치의 소형화 등에 대한 장점을 가지며 전원장치의 부하변동에 대한 실험결과로 부터 동작 타당성을 입증하였다.

Abstract

This paper presents a 37.5kVA(125kVp, 300mA) high frequency resonant inverter type power supply for diagnostic X-ray generator with two HFHV (High -Frequency High-Voltage) isolating transformers. The output regulations, X-ray tube voltage and tube current, are obtained by two high frequency inverters with the each other feedback PI controller and operating time switch for selecting shooting time and synchronizing two inverters. The operating modes and design consideration of the proposed power supply are given. Issues in the design of two HFHV isolating transformers for high voltage generating and filament heating are discussed. Experimental results are presented to verify the performance of the designed power supply for varying load conditions. The proposed apparatus has several advantages, e.g., the fast rising time of tube voltage, accuracy and reduced component size etc.

I. 서 론

X선은 외부의 영향을 거의 받지 않고 매우 강한 투과력을 가지고 있으며, ($10^4\sim 10^8$ eV)의 고속 전자가 용융점이 높고 증기압이 낮은 텅스텐과 같은 금속물질에

* 正會員, 韓國電氣研究所 電力電子 研究部

(Power Electronics Division, Korea Electrotechnology Research Institute)

** 正會員, 成均館大學校 工科大學 電氣工學科

(Dept. of Electrical Engineering in Sung Kyun Kwan University.)

接受日字: 1996年10月1日, 수정완료일: 1996年12月2日

충돌할 때 발생한다. 이러한 X선의 강한 투과력의 대표적인 응용분야로서 의료분야의 진단용 X선 시스템을 들 수 있는데, X선의 발생을 위해서는 먼저 X선관의 음극(cathode)부의 필라멘트를 가열하여 전자를 방출하고 음극과 양극(anode) 양단간에 고전압을 인가하여야 한다. 의료분야에서 인체 각부위의 X선 투시와 촬영때에는 최소한의 피폭량으로 정확한 진단을 하여야 하므로 빠르고 안정된 응답 특성의 X선 발생용 전원장치가 필요하게 된다. 한편, 진단용 X선 시스템에서 X선 발생에 필요한 에너지를 공급할 수 있는 고전압 발생 전원장치들이 꾸준히 연구되었는데, 종래 정류방식의 고전압 발생장치는 단상 또는 3상의 교류전원을

단권 변압기를 통하여 승압한 후, 이를 변압기 1차측에 가함으로써 전원 전압의 변동과 전원 임피던스의 변동에 따라 관전압 변동 현상이 발생하였다.^[1] 최근에는 고속 스위칭 전력용 반도체 소자를 채용한 다양한 형태의 인버터식 X선 전원장치들이 개발되고 있다. 인버터식의 고전압 발생장치에서는 교류 전원을 일단 직류 전원으로 변환하여 에너지를 충전하고 충전된 에너지를 인버터를 통하여 순간적으로 방출하여 X선을 발생시킴으로써 X선관전압은 입력 교류전원의 변동에 크게 영향을 받지 않게 된다. 또한, 고속 스위칭 전력용 반도체 소자를 사용함으로써 고전압 변압기의 1차측 인가 전압을 고주파화할 수 있고 이를 통하여 고전압 변압기의 크기를 소형화할 수 있다는 장점을 가지게 된다. 이에따라 고전압장치의 대폭적인 소형화 및 경량화 등을 실현할 수 있게 되었다.^[2] 본 연구에서는 고주파 대전력 변환 기술로서 고주파 공진형 인버터방식을 이용한 37.5kVA(125kVp (p : 피크치), 300mA)급 전단 X선용 전원장치의 개발을 위하여 공진요소로서, 제작된 고주파 고전압용 변압기의 기생 리액턴스 성분을 이용하였다. 또한, IGBT를 채용한 Phase-shift PWM 공진형 인버터를 20kHz의 고정 주파수를 갖는 고주파로 구동시킴으로써 X선 발생을 위한 전원장치의 소형 경량화를 이루고 노이즈를 저감하였다. 본 장치에서 고주파 공진형 인버터에 의한 X선관전압제어와 필라멘트 가열용 인버터를 사용한 관전류제어를 PI 제어기에 의해 연속적으로 조절하여 X선이 안정하게 발생하도록 하였다. 그리고 X선관에 인가되는 고전압의 정밀한 계측을 위하여 별렬 CR형 분압기와 필라멘트의 신속한 가열을 위한 고주파 변압기, 직류 고전압의 출력을 위한 고속 고전압 다이오드로 구성된 고전압 정류회로를 설계 제작하였다. 본 논문에서는 이러한 장치의 소형화와 고성능화를 목적으로 개발한 공진형 인버터식의 X선 전원장치를 소개하고, 실제장치의 구성과 그 결과를 제시하고자 한다.

II. 고주파 공진형 X선 전원장치

현재 전단용 X선 발생장치에 사용되는 회전양극 X선관은 음극의 필라멘트를 가열하여 전자를 발생시키게 되고 관의 양단에 20kVp에서 최대 150kVp의 직류 고전압을 인가함으로써 X선을 발생시키게 된다. 이때 방사된 X선의 에너지특성은 X선관에 공급된 직류 고

전압 파형의 맥동율에 의존하게 된다. 따라서 X선 발생 전원장치중 고전압 발생기에서 평활한 직류 고전압 파형을 출력하게 되면 회전양극 X선관의 총점 전체에 걸쳐 부하를 평균적으로 가하게 되므로 X선관 순간허용부하를 크게 할 수 있고 또한,

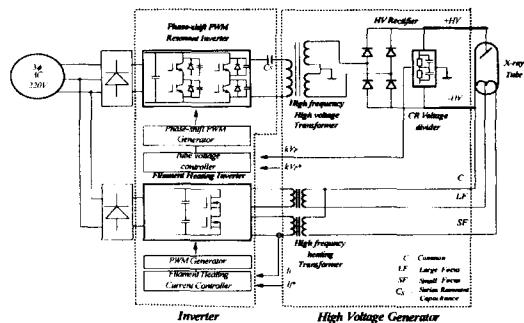


그림 1. 고주파 공진형 X선 전원장치 구성

Fig. 1. Schematic circuit of high frequency resonant type power supply for X-ray unit.

고전압 변압기의 동작 주파수를 고주파화함으로써 저령 관전압에 대하여 실제 출력 관전압의 빠른 상승 시간을 실현할 수 있으므로 단시간 X선 발생의 시간범위를 크게 단축할 수 있고, 이로 인하여 단위 시간당 X선 노출 시간을 최소로 할 수 있으므로 X선 퍼포먼스도 크게 감소시킬 수 있게 된다.^[2] 이에 따라 본 논문에서는 그림 1과 같이 Phase-shift PWM 공진형 인버터, 고전압 발생기로서 고주파 고전압 변압기, 고전압 정류기, 필라멘트 가열용 인버터와 가열용 변압기 그리고 관전압 제어기와 필라멘트 가열전류 제어기로 구성된 37.5kVA급의 안정된 X선 발생을 위한 전원장치를 제작하였다.

1. 고전압 발생용 인버터와 필라멘트가열용 인버터의 구성

종래, 전단 X선용 고전압 발생장치는 고전압 변압기 1차측 인가전압을 가변하기 위해서 단권 변압기를 사용하였다. 그러나, 이와 같은 단권 변압기의 사용은 임피던스를 증가시키게 되어 낮은 부하 인가시에는 관전압 파형이 왜곡되고 또한 관전류의 미세한 변동이 관전압에 영향을 끼치게 되므로 X선의 출력량에 변화가 생기게 된다. 또한, 관전압을 증가시킬 때 상승시간이 늦게 되어 전압파형이 삼각파에 가까워지기 때문에 mAs당의 X선 출력량이 저하하게 된다. 이에 따라 본

연구의 고전압 발생용 인버터는 공진 회로로서 고주파 고전압 변압기 내의 누설 인더턴스 성분과 표유 커페시턴스 성분에 추가로 외부 커페시터(C_s)를 직렬 연결하여 직렬 공진형 인버터로 동작하도록 하였다.^[3] 인버터의 스위칭 소자에는 IGBT를 사용함으로써 고전압 발생기의 동작 주파수를 20kHz 이상으로 동작도록 하였다. 또한, 기존의 공진형방식을 채용한 인버터식 고전압 발생장치가 대부분 주파수 변조방식에 의해 인버터의 출력을 제어하고 있으나 본 고주파 고전압 발생장치에서는 마그네틱 코어의 손실과 노이즈를 저감할 수 있고 자계요소의 이용효율을 키울 수 있는 고정된 주파수를 가지고 인버터의 출력을 제어 할 수 있는 Phase-shift PWM 방식으로 스위칭 제어되는 Phase-shift PWM 공진형 인버터를 구성하였다.^{[4], [5]}

한편, X선관전류를 조절하기 위한 필라멘트 가열장치에 있어서도 종래, 필라멘트 가열회로가 간단한 안정화 장치(stabilizer)만에 의해 구성되어 있어 정밀한 관전류 조절이 곤란하였다. 또한, X선관의 종류와 넓은 부하조건에 대응하기에는 제어회로가 복잡하고 회로크기가 늘어나게 되어 장치의 조정 및 Size에 문제가 되어 왔다. 이에 따라 본 연구에서는 이러한 문제점들을 보완하기 위하여 부품의 간략화를 위해 반파-브리지 인버터로 구성하였고 사용된 스위칭 소자로는 전력용 MOS-FET(IRF250)를 사용하였다. 본 장치의 필라멘트 가열 인버터는 PWM 방식에 의해 20kHz로 스위칭 하여 관전류 파형에 있어 리플을 저감하고 X선 발생 대기시간에서 필라멘트의 신속한 가열을 통한 가열 시간 단축이 가능하도록 하였고 동시에, 인버터의 고주파화로 필라멘트 가열 변압기의 소형화를 꾀하였다.

2. 고주파 고전압 변압기의 설계

인버터식 X선 전원장치중 고전압 발생기에서 고전압을 발생하기 위해서는 권선비가 큰 변압기를 사용하게 되며 특히, 고주파로 동작하는 고전압 발생기에서는 이러한 변압기의 설계 및 제작에 따른 고전압 절연기술이 가장 중요하다고 볼 수 있다.

그림 2와 3에서는 고주파 고전압 변압기 등가회로를 보였고 HFHV(High-Frequency High-Voltage)변압기 권선의 개략적인 구조를 나타내고 있다.

그림 2에서 L_{1T} 와 L_{2T} 는 1, 2차측 누설 인더턴스이고 L_α 는 여자인더턴스, R_c 는 코어 손실, C_{1T} 와 C_{2T} 는 1, 2차 권선과 대지와의 표유 커페시턴스, C_{12} 는 1,

2차 권선간의 표유 커페시턴스, n 은 권선비이다.

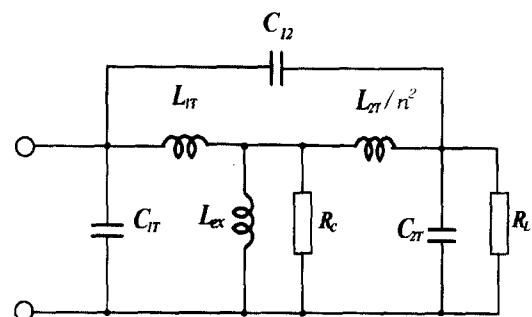


그림 2. 고주파 고전압 변압기의 등가 회로 모델
Fig. 2. Equivalent circuit model of the HFHV transformer.

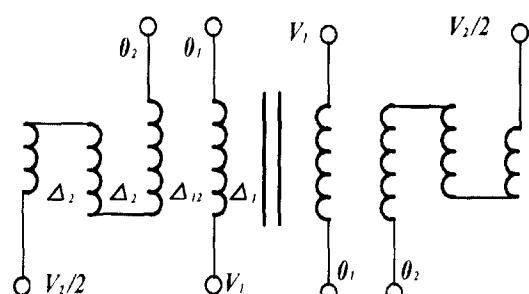


그림 3. 권선의 개략 구조
Fig. 3. Schematic diagram of winding.

그림 3에서 V_1 , V_2 는 1, 2차측 전압, θ_1 , θ_2 는 권선의 시작점, Δ_1 : 코어와 1차측 권선간 간격, Δ_2 는 2차측 권선층 간격, Δ_{12} 는 1, 2차 권선층간 간격이다.

2차측 권선은 그림 3과 같이 두 개로 분할하여 감았으며 그 감는 시작점이 중성점인 접지전위이므로 1차측 권선과는 특별히 고전압 절연시킬 필요는 없게 된다. 그리고 권선의 마지막 부분이 고전압이므로 2차측 권선층당의 권선수를 줄여 권선과 코어간의 거리를 유지하도록 설계하였다. 고전압 변압기의 설계에 있어서 주상변압기에서의 권선의 전류밀도는 $2\sim3 \text{ A/mm}^2$ 가 보통이나 X선용 변압기는 부하인가 시간이 짧으므로 $15\sim20 \text{ A/mm}^2$ 정도이고 단시간에 주상 변압기의 7배 정도의 전류가 흐르게 되므로 상대적으로 권선 저항은 매우 큰 수치가 된다. 그러나 X선용 고전압 변압기의 경우 안전전류보다 권선의 저항 손실이 문제가 되는데, 권선 저항은 권선의 단면적을 크게하므로 줄일 수 있으나 누설 리액턴스를 고려하지 않고 저항분을 줄이

게 되면 고전압 케이블의 정전용량과 누설 리액턴스 성분이 공진을 일으키기 때문에 경부하에서 관전압 파형이 진동을 일으키는 원인이 될 수 있다. 따라서 누설 리액턴스는 가능하다면 적게 하여야 한다. 그림 2와 3으로 부터 2차측 누설 리액턴스 X_{2L} 는 다음 식과 같이 구할 수 있다.^{[16], [17]}

$$X_{2L} = \mu_o 2\pi f_{inv} N_2^2 \cdot \frac{u_1 + u_2}{2h} \left(\frac{\Delta_{11} + \Delta_{22}}{3} + \Delta_{12} \right) \quad (1)$$

여기서,

μ_o : 자유공간에서의 투자율

f_{inv} : 인버터 주파수

u_1 : 1차측 권선 1턴의 평균길이

u_2 : 2차측 권선 1턴의 평균길이

h : 권선층의 길이

Δ_{11} : 1차측 권선층의 두께

Δ_{22} : 2차측 권선층의 두께

N_2 : 1차측 권선수

식 (1)로부터 L_{2T} 성분은

$$L_{2T} = X_{2L} / 2\pi f_{inv} \quad (2)$$

가 되고 이것을 1차측으로 환산한 누설 인더턴스는 L_{1T}/n^2 가 된다.

또한, L_{ex} 성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{ex} = \frac{\mu_o \mu_r N_1^2 S_c}{l} \quad (3)$$

여기서,

μ_r : 비투자율 N_1 : 1차측 권선수 S_c : 코어의 단면적 l : 자성체의 평균길이

한편, 그림 2의 표유 커패시터 성분들은 다음식들과 같이 표현된다.^[7]

$$C_{1T} = \frac{\epsilon_o \epsilon_r \rho h}{3} \cdot \frac{1}{\Delta_1} \quad (4)$$

$$C_{12} = \frac{\epsilon_o \epsilon_r \rho h}{3} \cdot \frac{1}{\Delta_2} \cdot \left(\frac{n}{m} \pm 1 \right)^2 \quad (5)$$

$$C_{2T} = \frac{\epsilon_o \epsilon_r \rho h}{3} \cdot \frac{1}{\Delta_2} \cdot \frac{3n^2(m-1)}{m^2} \quad (6)$$

여기서,

ϵ_o : 진공 유전율 ϵ_r : 비유전율 ρ : 1차측과 2

차측 권선의 길이 m : 권선층 수

제작된 고주파 고전압 변압기의 권선수는 다음과 같이 계산하였다.

변압기 1차측 권선수 설정에 있어 1차측의 전압 강하율을 5%로 감안 하였을 때 다음식에 의해서 1차측 권선수를 설정하였다.^[7]

$$N_1 = \frac{(V_1 - 0.05 V_1)}{4.44 f_{inv} B_s S_c} \quad (7)$$

여기서,

B_s : 포화 자속밀도(Gauss) S_c : 코어 단면적(cm^2)

식 (7)에서 S_c 는 다음 식과 같다.

$$S_c \cong c_o \sqrt{\frac{P \alpha 10^6}{f_{inv} B_s d}} \quad (\text{cm}^2) \quad (8)$$

여기서,

c_o : 계수 P : 전력(W) α : 코어의 질량/권선의 질량 d : 전류밀도 (A/mm^2)

2차측 권선수도 1차측과 같이 5%의 전압 강하율을 고려하여 다음 식과 같이 설정하였다.

$$N_2 = \frac{(V_2 + 0.05 V_2)}{V_1/N_1} \quad (9)$$

인버터의 출력 파형을 입력으로 받아서 고전압을 발생시키기 위해서는 고전압 변압기의 누설 인더턴스와 표유 커패시터 용량을 적절히 설정하지 않으면 고전압 출력 특성에 영향을 주게 되므로 변압기 설계시에 주의하여야 할 것으로 생각된다.

고전압 발생에 있어 배압회로를 변압기 2차측에 구성하여 동작하는 배압방식과 Direct 방식이 있는데 본 연구에서는 모두 제작하여 보았고 실험에서는 Direct 방식의 변압기를 사용하였다.

표 1은 설계, 제작된 고주파 고전압 변압기의 설계사양을 나타내었다.

3. 고주파 필라멘트 가열 변압기의 설계

X선 발생장치의 고전압 변압기의 구성은 대부분이 중성점 접지로 되어 있고 이에 따라 X선관의 양극은 양(+)의 고전압이, 음극에는 음(-)의 고전압이 걸리게 되므로 관의 음극에 설치된 필라멘트를 가열하기 위해서는 고전압으로부터 절연이 충분히 가능한 필라멘트 가열 변압기를 설계하여야 하고 고전압 절연을 고려하

여 필라멘트 가열 전류의 제어도 통상 변압기의 1차측 전류를 검출하여 제어하게 된다. 필라멘트 가열 전류 조정을 위한 가열장치에서 가열 인버터의 동작 주파수를 고주파화 하는 것이 가열 변압기의 소형화에는 유리하게 되지만 이로 인하여 가열 변압기의 누설 인더턴스가 크게 되고, 주파수의 증가로 인한 회로 임피던스의 상승이 고속의 필라멘트 가열을 방해하게 된다. 따라서 우선 가열 변압기의 설계에 있어서 누설 인더턴스 성분을 낮게 하는 것이 중요하다.^[8]

표 1. 고주파 고전압 변압기의 설계 사양
Table 1. Specification of HFHV transformer.

방식	구조	사용 Core 재질 및 Size	1차 Turn수 및 권선규격	2차 Turn수 및 권선규격	누설 인더턴스 $L(\mu H)$
Direct 배임	내철형, Pyramid 2중 권선 방식 (1차 병렬, 2차 직렬), 층간절연 : Acryl Spacer, 절연유	TDK PE 22 120×25×2	4 Turns 0mm 4조 Sc=(2×3)cm ² ×4	2520 Turns Φ0.2mm Litz Wire 1260 Turns Φ0.3mm Litz Wire (30KV 2500PF 2×2×4조)	18

고전압 발생기에서 X선관의 필라멘트 가열 정격이 최대 5.5A, 9.8V정도이므로 이 전력을 공급할 필라멘트 가열 변압기가 필요하게 되고 일반적으로, 진단 X선 발생 시스템에는 대총점(LF)과 소총점(SF)용으로 이중 총점 X선관이 사용되므로 필라멘트 가열용 변압기는 대총점용과 소총점용으로 두개의 변압기를 설치하게 된다. 본 장치에서는 필라멘트 가열용 변압기의 철심으로 경량이고 누설자속에 의한 와전류손의 저감이 가능한 페라이트(Fe₂O₃, PM1, UTV6460N)코어를 사용하여 고주파용 X선관 필라멘트 가열 변압기를 제작하였다. 제작된 가열 변압기의 외형은 64mm×59mm×32mm이며 무게는 보빈(bobbin)을 포함 약 210g으로 종래의 필라멘트 가열용 변압기의 1/5정도이고, 변압기의 누설 인더턴스는 종래의 약 1/10인 20μH 정도이다.

III. X선 발생 전원장치의 제어

1. X선관전압 제어기 구성

X선관전압을 제어하는 방법에는 고전압 발생기의 1

차측 전압을 가변하는 1차측 제어방식과 직접 2차측의 고전압을 제어하는 2차측 제어방식이 있는데, 본 연구에서 제작된 X선 발생장치는 고전압 발생기에서 X선관의 보호와 순간 허용부하 즉, 단시간 촬영시에 관전압의 작은 오버슈트와 빠른 상승시간 그리고 정상상태시에 최소 맥동율을 갖는 안정된 직류 고전압을 발생할 수 있도록 부하측(X선관)에서 고전압을 검출하여 X선관의 임피던스 변동에 따른 출력 고전압을 보상할 수 있는 피드백 제어회로를 가진 X선관전압 제어기를 설계하였다. 또한, 본 제어기를 통하여 X선 촬영시마다 X선 발생 재현성이 유지되도록 구성하였다.

그림 4에서는 본 X선 발생 전원장치의 관전압제어의 블록도를 나타내었다. 본 연구의 관전압 제어는 지령 관전압(kVp*)에 대하여 고전압(+HV, -HV)의 관전압을 CR형의 분압기를 통하여 검출한 실제 관전압(kVp)과 비교, 관전압 제어기인 PI제어기를 통하여 제어량을 출력하고 그 값에 따라 제어되어야 할 Phase-shift각을 Phase-shift PWM 발생기에서 출력하여 고전압발생용 공진형 인버터를 스위칭 함으로써 X선관 부하변동에 따른 관전압의 연속적인 보상이 가능하도록 하였다.^[7]

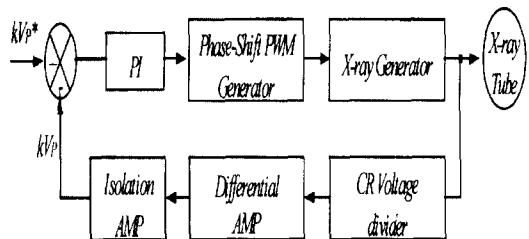


그림 4. X선관전압 제어 블록도

Fig. 4. Block diagram of X-ray tube voltage control.

2. X선관전류 제어기 구성

본 X선 발생 전원장치의 X선관전류는 필라멘트에 공급하는 필라멘트의 가열전류(I_f)를 조절함으로써 제어된다. 여기에서 제어하는 관전류는 0.5mA~300mA로 범위가 매우 넓지만, 필라멘트전류의 제어범위는 표 2에서 나타낸 것과 같이 정상상태에서 3.0A~5.3A 또는 4.1A~6A정도의 범위로 비교적 좁게 된다. 하지만, 필라멘트전류의 미소변동에 의해서도 관전류의 파형은 급격하게 변화하기 때문에 필라멘트의 가열전류를 보다 정밀하게 제어하는 기술이 필요하게 된다.^{[1], [4]}

일반적으로 필라멘트의 가열전류를 일정하게 한 경우, 수십 ms이상으로 X선을 조사하면 관전류가 X선 조사기간의 경과와 함께 감소하게 되는데, 이것은 X선 관의 관벽에 전하가 대전하게 되고 양극에 충돌한 열 전자가 감소하는 현상 때문이다. 따라서 열전자의 증감에 필요한 필라멘트 가열전류를 조절하는 필라멘트 가열전류의 피드백제어가 필요하게 되며 또한 가열장치의 전원인 상용 교류전압의 변동도 같이 고려되어야 한다. 이에 따라 그림 5에서는 본 연구에서 구성된 필라멘트 가열장치의 제어 블록도를 나타내었다.

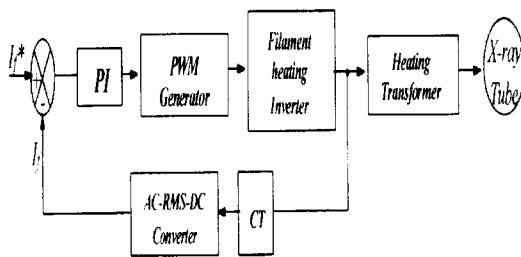


그림 5. 필라멘트 가열장치 제어 블록도

Fig. 5. Block diagram of filament heater control.

본 필라멘트 가열전류 제어는 X선 발사 발생 준비시간(ready time)에서 필라멘트의 빠른 가열과 발생시간에서의 열전자 감소를 보상하기 위하여 1차측 전류를 제어하는 가열전류 제어기로 PI 제어기를 구성하였고, 필라멘트의 예열상태(예비가열)로부터 X선의 조사가 가능하기까지의 대기시간인 X선조사 준비시간을 단축하기 위해서 X선 발사 준비기간중에 정상상태보다 더 큰 필라멘트 전류를 공급하도록 하였다. 그림 5에서와 같이 본 장치의 필라멘트 가열전류 제어기는 필라멘트 가열용 변압기의 1차측 전류를 CT로 검출하고 AC-RMS-DC 변환 회로에서 실효치로 변환한 후 변환된 값(I_f)을 목표의 필라멘트전류(I_f^*)값과 비교하여 필라멘트 가열전류를 제어하도록 구성하였다. 또한, X선 발생장치에서 필라멘트 가열장치는 X선 발생 준비시간전에는 초기지령치에 의해서 항상 X선관 필라멘트를 예비가열하게 되고, X선 발생 준비신호(ready signal)에 의해 필라멘트 가열전류의 피드백을 행함으로써 단시간에 최적으로 필라멘트를 가열하는 것이 가능하도록 하였다.

3. 타임 스위치부의 구성

본 전원장치에서 X선발생을 위해서 각 장치의 동작

모드별 동기 개폐(開閉) 신호를 발생시키기 위한 타임 스위치부를 그림 6과 같이 구성하였고, 이에 따른 진단 용 X선 전원장치에서 X선이 발생 될 때까지의 4가지 동작 모드를 구분하여 타임 스위치부의 동작을 설명하면 다음과 같다.

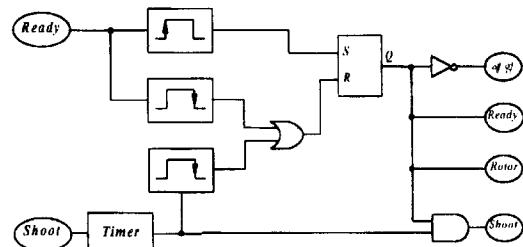


그림 6. X선 발생 전원장치의 타임 스위치부 개략도
Fig. 6. Schematic circuit of time switch for X-ray power generator.

모드 I

초기모드로서 X선관 음극의 필라멘트가 예열된다.

모드 II

고전압 발생장치의 선택모드로서 X선관의 부하 즉, 관전압(kVp), 관전류(mA)가 설정 되고, 타이머 회로에서 X선 발생시간(msec)이 선택된다.

모드 III

타임 스위치에서 준비(ready)신호가 발생되면 이 신호에 의해 필라멘트는 예열상태에서 X선 발생 대기시간 즉, ready 상태가 되고 필라멘트는 급속히 가열된다. 또한 이때, 양극 로터(Rotor)의 구동신호가 로터 구동회로부에 전달, 회전을 개시하여 텅스텐 타켓의 회전수가 3,600rpm에 이르게 되고, 이때의 시간은 0.4~0.8sec 정도를 요구한다.

모드 IV

X선 발생 모드로서 발생 개시신호(shoot)와 함께 X선이 설정된 조사시간 동안 발생하게 된다.

이상의 모드를 거친 후 연속촬영을 위해서는 필라멘트 예열상태를 거치지 않고 개시신호에 의해 연속적으로 X선을 발생시킬 수 있다.

IV. 실험 및 결과 고찰

본 실험 장치의 제작에 있어 고전압 발생기라 할 수 있는 고주파 고전압 변압기와 고전압 정류부 그리고 CR분압기와 필라멘트 가열용 변압기는 고전압으로부

터의 절연과 냉각을 유지하기 위하여 동일의 절연유탱크 안에 함께 설치하였다. 절연유는 불순물의 함유량에 따라 오일의 고온화 문제로 되기 때문에 그 순도를 특히 고려하였다.

본 고주파 X선 발생용 전원 장치에서는 고전압 변압기의 돌입 전류나, 기타 절연유파이프에 시스템의 보호를 위하여 직류 전원 투입시의 소프트-스타트 기능과 과전압, 과전류 보호 기능을 가진 보호회로를 구성하였고, 관전압 제어기와 필라멘트 전류제어기의 전압과 전류 검출은 전력단으로부터 접지점을 분리하여 써어지거나 노이즈로부터 제어기의 보호와 안정된 동작을 확보하기 위하여 절연 증폭기와 CT를 사용하였다.

표 2에서는 본 실험에서 사용된 Eureka사의 RAD-8 X선관의 특성 사양을 나타내었다.

표 2. 사용 X선관의 특성표

Table 2. Characteristic table of X-ray tube.

비교항목	사용Tube	Eureka RAD-8
관전압 [kVp]		40[kVp]~125[kVp]
관전류 [mA]		0.5[mA]~300[mA]
투시용 Small Focus 필라멘트 전압[V] 및 전류[A]		$V_f=3.0 \sim 7.0[V]$ $I_f=3.0 \sim 5.3[A]$ 사용시간: 0~5분
촬영용 Large Focus 필라멘트 전압[V] 및 전류[A]		$V_f=4.0 \sim 9.0[V]$ $I_f=3.0 \sim 5.3[A]$ 사용시간: 0.01[sec]~0.5[sec]

그림 7의 (a),(b)는 본 연구에서 설계, 제작된 고전압 발생기로서 고전압 절연된 병렬 CR형 분압기와 고전압 정류부를 포함한 고주파 고전압 변압기와 필라멘트 가열용 변압기의 실물 사진이다.

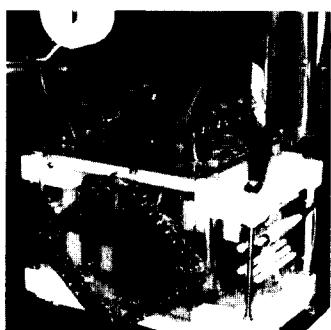


그림 7. 제작한 고주파 고전압 변압기와 필라멘트 가열용 변압기

Fig. 7. Prototype HFHV transformer and filament heating transformer.

그림 8에서는 X선관 양단에 걸리는 직류 고전압 파형의 정밀한 측정을 위하여 본 실험에서 제작한 병렬 CR형 분압장치의 동작특성 파형으로 표준 전압 임펄스 발생기에서 발생된 고전압을 표준 고전압 측정장치로 측정한 결과(그림 위)와 본 실험에서 제작된 CR형 분압장치로 측정한 결과(그림 아래)를 비교하였을 때의 파형을 나타내었다. 그림에서 비교한 파형과 같이 본 실험에서 제작된 CR형 분압기의 상승시간이 315nsec 더 빠름을 보여주고 있다. 그림 10에서는 X선 발생시 활영과 투시모드에서의 X선관 전압파형을 나타내었다. 관전압 120kVp의 설정치에서 양호하게 X선관에 고전압이 인가됨을 볼 수 있다.

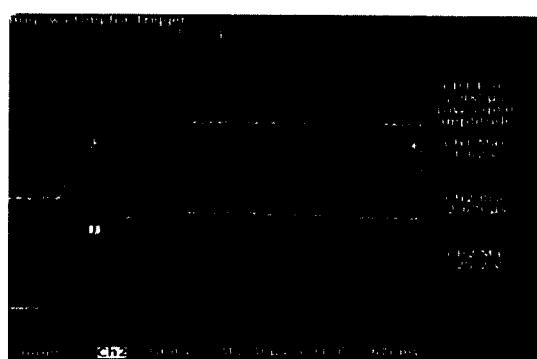


그림 8. 병렬 CR형 분압기의 출력특성 [1 μ sec/Div]

Fig. 8. Output characteristic of the parallel CR voltage divider [1 μ sec/Div]

그림 9에서는 X선관 전류를 조절하기 위하여 음극의 필라멘트 가열 전류를 제어할 때 가열전류를 실효치로 변환하여 나타낸 파형으로, 필라멘트의 초기 예열 상태인 1.8A의 예열 전류로부터 X선 발생시 관전류를 조정하기 위한 가열 전류 지령치를 3A로 하였을 때와 4A, 4.9A로 하였을 때의 필라멘트 가열 전류 제어기의 동작특성을 실험한 파형으로 빠른 시간안에 지령 가열 전류를 추종함을 보여주고 있다.

V. 결 론

본 연구는 최근 의료용 X선 발생 시스템에서 요구하는 무소음화와 장치의 소형화를 위하여 37.5kVA급 공진형 X선 발생 장치의 구동 주파수를 고주파화하고 X선관전압 제어기와 관전류 제어기를 구성하여 진단용 X선 발생기의 고성능화를 목적으로 하였으며 이에 따

라 다음과 같은 결과를 얻었다.

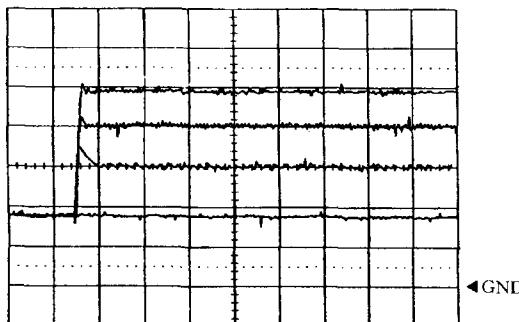
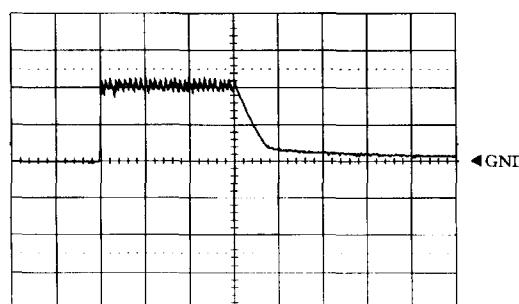


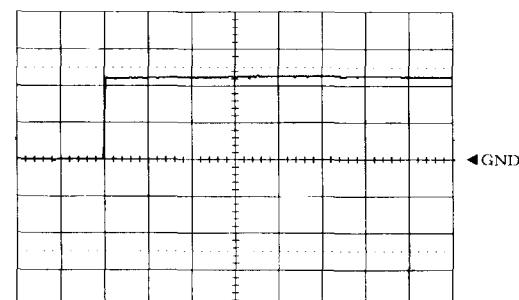
그림 9. 필라멘트 가열전류 제어 실험 과정 [1A/Div.], [5msec/Div.]

Fig. 9. Experimental waveforms of the filament heating current control. [1A/Div.], [5msec/Div.]



[50kV/Div.], [10ms/Div.]

(a) 촬영모드시 과정(IT=100mA)



[50kV/Div.], [10ms/Div.]

(b) 투시모드시 과정(IT=4mA)

그림 10. X선관 전압파형

Fig. 10. Voltage waveforms of the X-ray tube.

1) 고전압 발생기의 고전압 변압기는 누설 인더턴스 성분을 이용하여 공진 회로를 구성하고 Phase-shift

PWM 인버터에 의해 고주파 동작시킴으로써 장치의 소형 경량화를 도모하였고 고밀도전력, 저노이즈와 빠른 과도응답특성을 갖도록 하여 X선 장치의 효율적 운전이 되도록 하였다.

2) 고전압 발생장치의 주요 부분인 고전압 변압기와 필라멘트 가열용 변압기를 고주파용으로 설계, 제작하여 X선 발생장치의 소형, 경량화의 실현이 가능하도록 하였다.

3) X선관의 순간허용부하나 X선관 부하변동시에 빠른 고전압 상승시간과 안정된 고전압의 공급을 위하여 관전압 제어장치를 구성, X선의 정밀한 조사와 안전성을 확보할 수 있도록 하였고 고전압의 정확한 검출을 위하여 분압장치로서 응답특성이 빠른 CR형 분압기를 제작하였다.

4) 고전압발생기의 출력으로 발생된 X선량의 정밀도를 위하여 관전류를 조절할 수 있는 X선관 필라멘트 가열장치를 PI 제어기에 의하여 X선 조사대기시간에서 신속한 필라멘트의 가열과 또한 X선 발생중 열전자량의 연속적인 보상이 가능하도록 하였다.

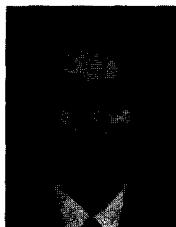
본 연구에서 제안된 X선 발생용 고전압 발생장치는 의료용 X선 장치뿐만 아니라 비파괴 검사등 산업용 X선 장치에서도 응용이 가능하고 또한 고주파 고전압의 펄스 전력 응용 분야에 다양한 적용이 가능하리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Izumi Ogura, and T.Aoyagi, "Analysis of the Basic Motion of the Resonance Type Inverter X-ray Generator by the Model Circuit", 東京都立醫療技術短期大學紀要, 第6号, pp. 193-207, 1993.3.
- [2] Kelly J. P and Trout E. D, "Physical Characteristics of the Radiation from 2-Pulse, 12-Pulse, and 1,000-Pulse X-Ray Equipment", Radiology 100, pp. 653-661, 1971.
- [3] Jun Takahashi, Hiroshi Takano, Mutsuo Nakaoka, "A state of the art 50kW-10kHz Soft-Switching Assisted PWM DC-DC Converter for X-Ray Power Generator", PCC-Yokohama'93 Conference Proceedings, pp. 165-170, Apr. 1993.

- [4] 김학성, 원충연, "X선 발생기용 공진형 고전압 발생기", 전자공학회 논문지, 제33권, B편, 제4호, pp. 217-225, 1996.4.
- [5] D. M. Divan and G. Skibinski, "Zero Switching Loss Inverters for High Power Applications", IEEE IAS Conference Proceedings, pp. 627-634, 1987.
- [6] M. Nakaoka and H. Ogiwara, "High-Frequency PWM Resonant Converter-Base X-ray Power Generator Utilizing Equivalent Lumped Parasitic Circuit Components of High-Voltage Transformer and Feeder Ca-
- ble", PEMC'90 Proceedings of the 6th Conference on Power Electronics and Motion Control, pp. 264-268, October, 1990.
- [7] С. С. ВЛОВИН, ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ, ЭНЕРГИЯ Ленинградское отделение, 1971
- [8] 유동욱, 하성운, 백주원, 김학성, 김승환, 원충연, "X선관 필라멘트 가열장치를 위한 영전압 스위칭 위상차 제어 PWM 인버터의 설계", 대한전기학회, 전력전자연구회 춘계학술연구 발표회논문집, pp. 367-400, 1996.4.

저자 소개



金 學 成(正會員)

1964년 11월 8일 생. 1989년 2월 성균관 대학교 전기공학과 졸업(공학사).
1991년 8월 성균관 대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1996년 8월 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년 9월 ~ 현재 한국전기연구소 전력전자연구부 Post-doc. 주관심분야는 High-Frequency High-voltage converter 응용, High-Power Resonant Inverter, 대체 에너지 응용

林 根 熙(正會員) Journal of Electrical Engineering and Information Science Vol. 1, No. 3. 참조
현재 한국전기연구소 전력전자연구부 전력변환팀 팀장

俞 東 旭(正會員) 第33卷 B編 第5號 參照

元 忠 淵(正會員) 第33卷 B編 第4號 參照

현재 성균관 대학교 전기공학과 부교수