

# EDLC를 이용한 X선 투시촬영장치용 하이브리드 X선 제너레이터

(Hybrid Type X-Ray Generator Using EDLC for Fluoroscopy X-Ray System)

서영민\* · 홍순찬\*\*

(Young-Min Seo · Soon-Chan Hong)

## Abstract

A diagnostic fluoroscopy X-ray system uses a 32kW or greater X-ray generator for obtaining real-time moving images and high-resolution images. Fluoroscopy X-ray systems have to use a high-capacity AC power source to perform long-time low-power fluoroscopy and short-time high-power spot exposure. In this paper, we propose a hybrid type X-ray generator for fluoroscopy X-ray system which can perform fluoroscopy and spot exposure with a low-capacity AC power source and an energy storage device. The characteristics of energy storage devices are compared and each energy storage device is modelled to equivalent circuit. And the characteristics of available energy are analyzed as a function of output voltage and power. A 32kW class hybrid X-ray generator with EDLC as an energy storage device for fluoroscopy X-ray system was constructed, and its validity was verified by means of simulations and experiments.

Key Words : HVPS, X-ray, X-ray Generator, Fluoroscopy, EDLC, Energy Storage Device

## 1. 서 론

의료용 X선 영상장치는 사용목적에 따라 X선 촬영 장치, X선 투시촬영장치, 혈관조영장치, 단층촬영장치

등으로 분류된다. X선 촬영장치는 가장 보편적으로 사용되는 X선 영상장치로서 수 ms에서 수 s 범위의 단시간 동안에 X선 제너레이터로부터 대전력의 고전압을 입력받아 X선 촬영을 한다. X선 촬영장치에서 진단이 가능한 X선 사진을 얻기 위해서는 일반적으로 32kW 이상의 X선 제너레이터를 사용해야 한다 [1-2].

전원입력으로 상용 AC 전원을 사용하는 경우 설비용량 조건에 의해 사용 장소에 제한을 갖게 되며, 장비는 전압강하, 주파수 변동, 고주파 왜곡, 정전 등과 같은 전력 품질에 민감하게 된다. 이에 따라 전원설비용량이 부족한 소형 병의원이나 전력사정이 좋지 않은 국가 등에서는 에너지저장장치를 기반으로 하는 X선

\* 주저자 : 단국대학교 대학원 전기공학과 박사과정  
\*\* 교신저자 : 단국대학교 전자전기공학부 교수  
\* Main author : Doctor's course, Department of Electrical Engineering, Dankook University  
\*\* Corresponding author : Professor, School of Electronics & Electrical Engineering, Dankook University  
Tel : 031-8005-3609, Fax : 031-897-3610  
E-mail : schong@dku.edu  
접수일자 : 2014년 7월 13일  
1차심사 : 2014년 7월 16일  
심사완료 : 2014년 8월 1일

촬영장치가 선호되고 있다. 초기에는 연축전지를 직렬로 접속한 에너지저장장치를 사용하는 X선 촬영장치가 많이 보급되었으나 연축전지의 단수명과 환경규제 등의 단점으로 인해 전해커패시터를 기반으로 하는 X선 촬영장치의 사용이 늘어나고 있다[3].

X선 촬영에 필요한 단시간 대전력 에너지를 공급해 줄 에너지저장장치에는 연축전지, 전해커패시터, EDLC(Electrical Double Layer Capacitor: 전기이중층 커패시터) 등이 있다. 연축전지는 상대적으로 작은 부피와 중량으로 많은 에너지를 저장할 수 있기 때문에 의료기기를 포함한 다양한 분야에서 에너지저장장치로 널리 이용되어 왔다[4]. 전해커패시터는 단시간 높은 출력을 발생시킬 수는 있으나 에너지 밀도가 낮은 특성으로 인해 출력시간이 많이 제한되는 단점이 있다[5]. EDLC는 연축전지와 전해커패시터의 장점을 모두 갖춘 에너지저장장치로서 연축전지보다 출력밀도가 높고 전해커패시터보다 보다 높은 에너지밀도를 가지고 있으며 수명이 길고 친환경적이다[6].

혈관조영장치나 단층촬영장치는 장비의 특성상 장시간 고출력 에너지를 필요로 하는데 대학병원이나 종합병원 등의 규모가 큰 의료시설에 설치되기 때문에 전원설비를 보완하기 위한 목적의 에너지저장장치가 필요하지 않다. 하지만 X선 투시촬영장치는 소형 병원에서도 많이 사용되고 있으므로 에너지저장장치의 사용이 요구되고 있다.

본 논문에서는 에너지저장장치를 적용하여 3kVA 정도의 전원설비로도 X선 투시 및 X선 촬영이 가능한 X선 투시촬영장치용 X선 제너레이터를 제안한다. 제안한 X선 제너레이터는 에너지원으로 교류전원과 에너지저장장치를 동시에 사용하는 하이브리드 방식으로 투시와 촬영이 가능하다. 투시모드에서는 교류전원에서 정류회로를 통하여 직접 소전력의 에너지를 연속적으로 공급받고, 촬영모드에서는 에너지저장장치로부터 단시간에 고출력 에너지를 공급받는다.

제안한 X선 투시촬영장치용 X선 제너레이터에 사용할 에너지저장장치로 연축전지, 전해커패시터 및 EDLC를 검토한다. 각 에너지저장장치의 특성을 비교하고 등가회로를 구성하여 X선 투시촬영장치의 에너지원으로 사용시 다양한 부하조합에서의 가용에너지

특성을 분석한다. 끝으로 32kW급의 X선 투시촬영장치용 X선 제너레이터를 구성하여 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안한 시스템의 효율성을 입증한다.

## 2. X선 투시촬영장치용 제너레이터

### 2.1 X선 투시촬영장치

X선 투시촬영장치는 X선 제너레이터 및 X선관으로 구성되는 X선 발생장치, 환자테이블과 X선 영상장치 등으로 구성된다. X선 투시촬영장치는 소화기 진단에 사용되는데 황산바륨 계열의 조영제 등을 이용하여 투시영상을 얻을 수 있다.

X선 영상의 품질은 X선관에 인가된 전압(관전압)에 비례하는 X선 방사에너지에 의해 우선적으로 결정되며, X선 영상의 대조도는 정상상태 전압맥동, 상승시간, 하강시간과 같은 관전압의 동특성에 영향 받는다. X선 영상의 밝기를 결정하는 전체 X선 선량은 X선관에 흐르는 전류(관전류)와 노출시간에 비례한다. 혈관이나 심장과 같이 움직이는 장기의 X선 영상을 얻기 위해서는 아주 짧은 시간동안 X선을 조사해야 잔상에 의한 화질 저하를 방지할 수 있으므로 높은 관전류를 출력할 수 있는 X선 고전압발생장치가 필요하다.

의료용 X선 투시촬영장치는 투시와 촬영을 위해서 32kW 이상의 정격출력이 필요한데, 이를 위해 일반적으로 40kVA 이상의 전원설비를 필요로 한다. 32kW급의 X선 제너레이터에서 관전압은 40~150kV 범위에서 선택할 수 있으며 관전류는 정격출력과 관전압에 의해 제한되는데 10~400mA까지의 범위를 갖는다.

X선 투시는 펄스전류 방식을 사용하며 10~40mA 범위의 관전류를 영상처리장치와 동기를 맞춰서 1~30 PPS(Pulse Per Second)로 출력하게 된다. 투시는 촬영에 비하여 10% 정도의 전력을 필요로 하지만 장시간 사용이 가능해야 하므로 배터리 등의 에너지저장장치로는 에너지를 공급하기 어렵다. X선 투시촬영장치는 투시와 촬영이 모두 가능해야 하므로 촬영에 필요한 대전력 공급이 가능한 전원설비를 필요로 한다.

## 2.2 X선 제너레이터

X선 제너레이터는 그림 1과 같이 정류기, X선관의 양극과 음극에 고전압을 인가하기 위한 고전압발생장치(High Voltage Power Supply), X선관의 음극 필라멘트에 전류를 공급하는 필라멘트 구동회로(Filament Driver), X선관 양극을 회전시키기 위한 로터 구동회로(Rotor Driver)와 고전압 제어회로로 구성된다.

X선관의 필라멘트를 가열하여 열전자를 발생시키고 X선관의 양극과 음극에 고전압을 인가하면 열전자가 가속되어 양극에 부딪히면서 X선이 발생된다. 이때 X선의 발생효율은 최대 1% 정도이고 나머지는 열로 변환되어 양극의 온도를 상승시킨다. 로터 구동회로는 X선관의 고정자권선에 회전자계를 발생시켜 내부의 양극을 3,000 혹은 10,000rpm의 고속으로 회전시킴으로써 X선 조사시에 발생하는 열을 분산시켜 높은 출력의 X선을 발생시킬 수 있게 한다.

X선관의 음극 필라멘트 전류는 독립적인 전류 제어 필라멘트 구동회로에 의해 제어되며, X선관은 필라멘트의 온도에 종속적으로 제어되는 가변저항처럼 동작한다[7]. X선관의 등가저항은 관전압, 양극온도, 양극회전속도 등에 영향을 받지만 필라멘트 전류에 의해 크게 변하며, 보통 수십 kΩ에서 수 MΩ 범위에 있다.

X선 제너레이터에서 고전압발생장치는 X선관에 공급되는 관전압을 발생시키는 부분으로서 풀브리지 공진형 변환기로 고주파 AC 전압을 생성하고, 다

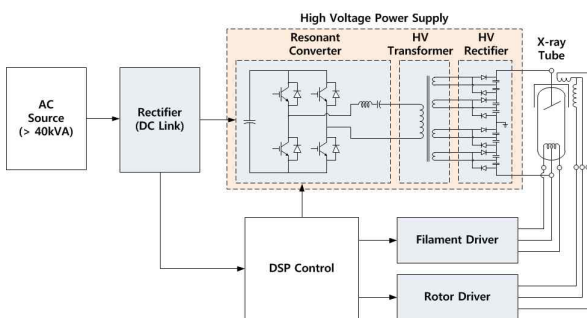


그림 1. X선 투시촬영장치용 X선 제너레이터  
Fig. 1. X-ray generator for fluoroscopy X-ray system

중 2차 권선을 갖는 고주파 고압변압기와 고압정류 회로를 사용하여 승압비를 높여 원하는 고전압 출력을 얻는다.

## 3. 에너지저장장치

### 3.1 에너지저장장치의 특성

X선 제너레이터에 사용가능한 에너지저장장치인 연축전지, 전해커패시터, EDLC의 출력 특성을 비교하여 분석한다. 표 1은 연축전지, 전해커패시터, EDLC의 특성을 나타낸 표이다[3].

표 1. 에너지저장장치의 특성  
Table 1. Characteristics of Energy Storage Devices

특성	연축전지	전해커패시터	EDLC
Energy Density (Wh/kg)	30~100	< 0.1	1~10
Power Density (W/kg)	50~200	>10,000	1,000~2,000
Lifetime (Years)	3~5	5~10	10~15
Efficiency	0.7~0.85	~1.0	0.9~0.95
Cycle Life	500~2,000	Infinite	> 5,000,000

연축전지는 에너지밀도가 30~100Wh/kg으로 세 저장장치 중에 가장 높지만 전력밀도는 가장 낮다. 또한 충방전 효율이 나빠며 수명과 사이클 수명이 짧은 단점이 있다. 최근 들어 납, 수은, 카드뮴, 6가 크롬, 브롬계 난연제(PBBs, PBDs)의 6대 유해물질 제한지침 RoHS(Restriction of Hazardous Substances Directive)와 EU의 새로운 화학물질관리규정 REACH 등의 환경규제로 인해 연축전지의 사용이 점차 감소될 것으로 예상된다.

전해커패시터의 경우 전력밀도가 10,000W/kg 이상으로 가장 높지만 에너지밀도가 낮아 연속적인 에너지 공급이 어렵다. 효율과 수명은 긴 편이다.

EDLC는 에너지밀도가 1~10Wh/kg, 전력밀도는 1,000~2,000W/kg으로 연축전지와 전해커패시터의 중간적인 특징을 갖고 있으며 수명은 10년 이상으로 가장 길고 효율과 사이클 수명도 좋다.

### 3.2 등가모델

전해커패시터와 EDLC의 등가모델은 그림 2와 같다. 전해커패시터의 등가모델은 그림 2 (a)와 같이 커패시터-저항 직렬회로로 구성되는데, 여기서  $ESR$ 은 등가직렬저항이며  $C$ 는 전해커패시터의 공칭용량이다.  $ESR$  값은 발열손실계수(DF, Dissipation factor)를 이용하여 계산한다[8]. DF는 임피던스 평면에서  $ESR$ 과  $C$ 의 손실각을 의미한다. DF 값은 제조사의 데이터시트에 명시되어 있으며 이를 이용하여  $ESR$ 을 계산한다.

EDLC의 전기적인 응답특성을 명확하게 하기 위하여 전기화학적 메커니즘을 기본으로 서로 다른 시정수를 가지는 3병렬 RC 전송회로로 등가화한다[9]. 그림 2 (b)는 EDLC의 등가모델로서 커패시터와 저항이 병렬로 구성되어 있으며 각 전송라인의 파라미터는 실험적인 방법에 의해 산출된다[10]. 첫 번째 전송라인  $R_1C_1$ 은 약 수 초 동안의 단시간 충방전을 결정하는 요소이고, 두 번째 전송라인  $R_2C_2$ 는 수 분, 세 번째 전송라인  $R_3C_3$ 는 수십 분 이상의 장시간 충방전 특성을 가진다. 이러한 3병렬 RC 전송회로 방식은 정격 단자 전압의 40% 이상의 전압에 대하여 EDLC 내부의 충방전 특성을 매우 잘 반영하고 있으며 충방전 시간 동안 EDLC의 동특성을 간단하게 구성할 수 있어 보편적으로 사용되고 있다.

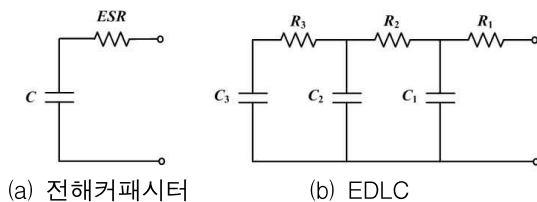


그림 2. 에너지저장장치의 등가모델  
Fig. 2. Equivalent models of energy storage devices

### 3.3 가용에너지

에너지저장장치를 X선 고전압발생장치의 에너지원으로 사용할 때 부하에 따른 가용에너지 특성을 분석하기 위하여 아래와 같이 가정한다.

- (1) X선 출력을 하는 동안 고전압발생장치는 평균 입력전압  $V_{avg}$ 와 등가 전류부하  $I_{HVPS}$ 로 일정하게 출력전력  $P_{out}$ 을 발생시킨다.
- (2) 고전압발생장치의 내부저항은 입력전압의 강하와 무관하게 등가저항  $r_{HVPS}$ 으로 일정하다.

고전압발생장치의 평균 입력전압은 식 (1)과 같이 에너지저장장치의 초기전압  $V_{ESD}$ , 고전압발생장치의 출력전압  $V_{out}$  및 전압전달률  $tv_{HVPS}$ 을 사용하여 구한다. 등가 전류부하  $I_{HVPS}$ 는 식 (2)와 같이 출력전력과 평균 입력전압을 사용하여 구한다.

$$V_{avg} = \frac{1}{2} \left( V_{ESD} + \frac{V_{out}}{tv_{HVPS}} \right) \tag{1}$$

$$I_{HVPS} = \frac{P_{out}}{V_{avg}} = \frac{P_{out}}{\frac{1}{2} \left( V_{ESD} + \frac{V_{out}}{tv_{HVPS}} \right)} \tag{2}$$

고전압발생장치에서의 전력손실은 내부저항이 일정하므로 식 (3)과 같이 등가저항의 항으로 표현된다. 고전압발생장치에서 원하는 출력전압을 얻기 위해 요구되는 입력전압의 최소값은 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$P_{l,HVPS} = r_{HVPS} I_{HVPS}^2 \tag{3}$$

$$V_{in,min} = \frac{V_{out}}{tv_{HVPS}} + r_{HVPS} I_{HVPS} \tag{4}$$

그림 3은 등가용량  $C_{eq}$ 와 내부저항  $r_{int}$ 로 모델링된 에너지저장장치를 전원으로 사용하는 고전압발생장치에서 정전류  $I_{HVPS}$ 로 방전하는 경우의 간략화된 등가회로이다. 이때 에너지저장장치의 가용에너지  $E_{av}$ 는 방전개시전압과 방전종료전압으로부터 식 (5)와 같이 구할 수 있다. 가용에너지의 양은 등가용량에 비

례하며 내부저항, 방전전류 및 고전압발생장치의 입력 전압 최소값의 영향을 받는다.

$$E_{av} = \frac{1}{2} C_{eq} ((V_{ESD} - r_{int} I_{HVPS})^2 - V_{in,min}^2) \quad (5)$$

에너지저장장치를 전원으로 사용하는 고전압발생장치의 가용에너지 특성을 그림 4에 나타내었다. 식 (1) ~ 식 (5)를 사용하였으며, 출력전압과 출력전력에 따른 가용에너지의 양을 각 에너지저장장치의 공칭값에 대하여 정규화한 것이다. 그림 4 (a)는 연축전지, 그림 4 (b)는 전해커패시터, 그림 4 (c)는 EDLC의 부하에 따른 가용에너지 특성이며 이를 분석하면 아래와 같다.

연축전지는 출력전력이 높아질수록 내부저항에서의 전압강하와 배터리의 용량 저감으로 인해 가용에너지가 공칭값보다 매우 작아진다. 출력전류가 1C로 낮을 때는 가용에너지가 50% 정도로 높은 편이지만 출력전류가 15C 이상이 되면 가용에너지가 5% 미만인 된다. 전해커패시터는 내부저항이 아주 작아서 출력전력이 증가하더라도 내부저항에 의한 전압강하가 가용에너지에 별로 영향을 주지 않는다. 최대부하 조건에서도 가용에너지가 60% 이상으로 에너지이용률이 가장 우수하다. EDLC는 연축전지와 전해커패시터의 중간 정도의 가용에너지 특성을 보이며 최대부하 조건에서 가용에너지가 50% 정도이다[3].

X선 투시촬영장치용 고전압발생장치는 단시간 대전력의 촬영용 에너지원과 장시간 소전력의 투시용 에너지원이 필요하다. 전해커패시터는 전력밀도가 높아서 대전류 출력에도 적합하지만 다른 에너지저장장치에 비해 에너지밀도가 낮아 저장된 에너지가 적을 수밖에 없다. 따라서 대전력 출력이 필요한 X선 촬영에서 전해커패시터를 사용하게 되면 교류전원에서 직접 에너지를 공급받게 되므로 촬영을 위한 에너지저장장치로는 적합하지 않다. 병렬 접속수를 늘려서 저장에너지를 증가시킬 수는 있지만 비용적인 측면에서 비효율적이다. EDLC는 연축전지와 전해커패시터의 중간에 위치한 에너지저장장치로서 에너지밀도와 전력밀도가 높아서 촬영에 필요한 대전력 출력이 가능하다.

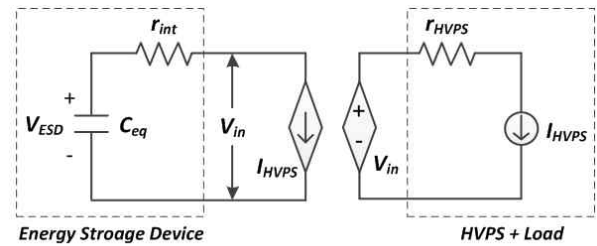
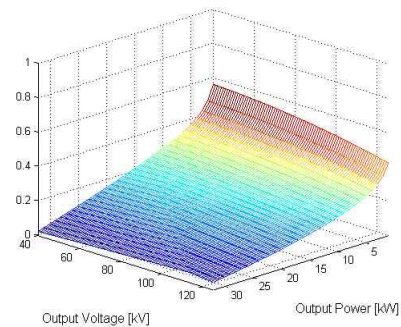
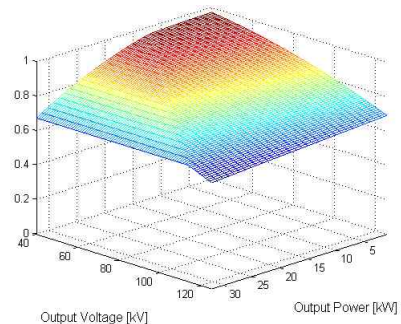


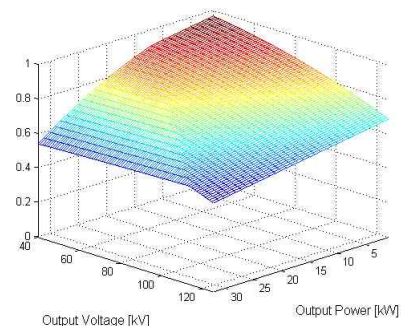
그림 3. 간략화된 등가회로  
Fig. 3. Simplified equivalent circuit



(a) 연축전지



(b) 전해커패시터



(c) EDLC

그림 4. 에너지저장장치의 가용에너지 특성  
Fig. 4. Available energy characteristics of energy storage devices

### 4. 하이브리드 X선 제너레이터

본 논문에서는 전원설비용량이 부족한 병의원이나 전력품질이 좋지 못한 국가에서도 설비증설 등의 추가비용 없이 X선 투시촬영장치를 사용할 수 있도록 새로운 X선 제너레이터를 제안한다.

제안하는 X선 제너레이터는 투시와 촬영에 필요한 에너지를 교류전원과 EDLC에서 각각 공급받는 하이브리드 방식이다.

#### 4.1 구성

제안한 X선 제너레이터는 그림 5와 같이 전해커패시터와 EDLC를 사용하는 하이브리드 전원입력회로와 고전압발생장치, 필라멘트 구동회로, 로터 구동회로로 구성된다.

하이브리드 전원입력회로는 투시모드에서는 교류전원에서, 촬영모드에서는 EDLC에서 에너지를 공급하도록 설계된 회로이다. 촬영모드에서 필요한 에너지를 공급하는 EDLC 모듈은 X선 고전압발생장치에서 필요한 최소 입력전압인 300V를 만족하기 위해서 2.7V, 350F 용량의 EDLC 130개를 직렬로 접속한 EDLC 모듈을 사용한다.

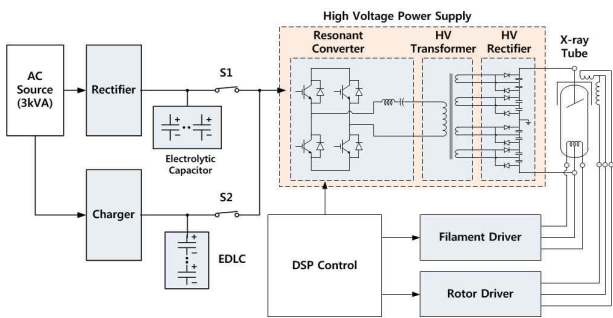


그림 5. 제안한 X선 제너레이터  
Fig. 5. Proposed X-ray generator

#### 4.2 하이브리드 전원입력

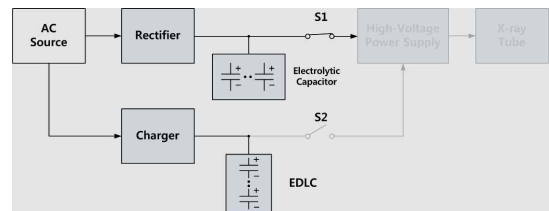
제안한 X선 투시촬영장치용 X선 제너레이터는 대기모드, 투시모드, 촬영모드의 3가지 모드로 동작하며

각 모드별 회로는 그림 6과 같다. 대기모드는 X선을 출력하지 않는 상태로 교류전원은 전해커패시터와 에너지저장장치인 EDLC를 충전한다. 투시모드에서는 교류전원으로부터 정류회로와 전해커패시터를 거쳐 에너지를 공급받아 X선 투시를 하며 촬영모드에서는 EDLC 모듈에서 에너지를 공급받아 고출력의 X선 촬영을 한다. 표 2와 같이 스위치 S1과 S2의 조합으로 각 모드에서의 에너지원을 선택하게 된다.

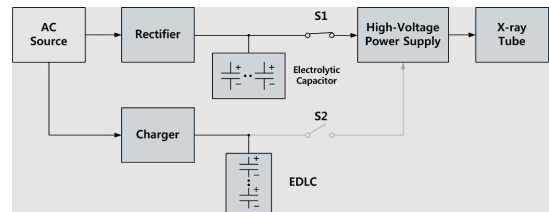
표 2. 제안한 X선 제너레이터의 구동모드  
Table 2. Operating modes of proposed X-ray generator

모드	S1	S2	HVPS
대기모드	ON	OFF	OFF
투시모드	ON	OFF	Pulse
촬영모드	OFF	ON	DC

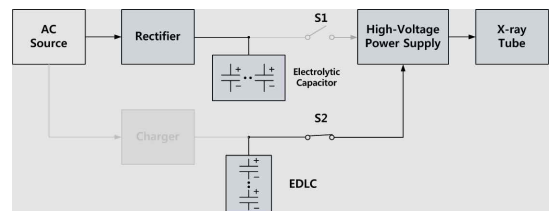
비고 : S1, S2는 그림 6 참조



(a) 대기모드



(b) 투시모드



(c) 촬영모드

그림 6. 모드별 회로  
Fig. 6. Circuits at each mode

### 4.3 고전압발생장치

제안한 X선 제너레이터에서 고전압발생장치는 그림 7과 같이 X선관의 양극에 양의 고전압을 공급하는 양극 고전압발생부와 X선관의 음극에 음의 고전압을 공급하는 음극 고전압발생부로 구성된다.

각 고전압발생부는 출력을 중첩시킨 2개의 공진형 인버터와 고압탱크(HT Tank)로 구성된다. 고압탱크는 내부에 고전압 변압기와 고전압 배압회로 등이 배치되며 절연유와 고체절연물로 절연한다. 공진형 인버터에서 생성된 위상차를 갖는 고주파 교류전압이 고전압 변압기에서 승압되고 고전압 배압회로에 의해 승압 정류되어 출력 관전압을 형성한다. N상 공진형 인버터로 구성된 고전압발생부의 출력 관전압의 맥동 주파수는 식 (6)과 같이 상 수 N에 비례하여 증가된다 [11]. 맥동전압의 크기는 스위칭주파수, 상 수 및 부하 전류에 의해 결정되는데 식 (7)과 같이 상 수에 반비례한다.

$$f_{ripple} = 2N \cdot f_s \quad (6)$$

$$V_{ripple} = f(f_s, N, I_{load}) \propto \frac{1}{N \cdot f_s} \quad (7)$$

## 5. 시뮬레이션

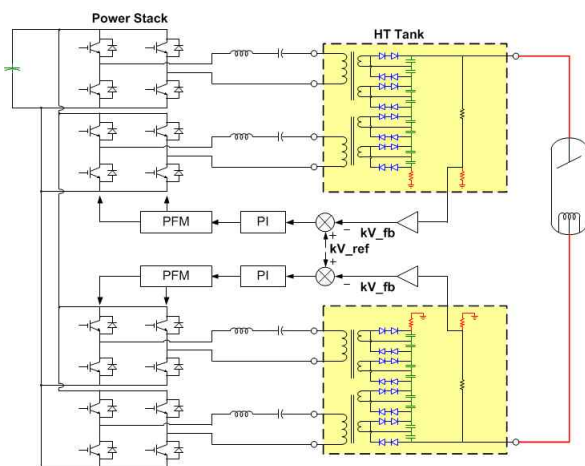


그림 7. 고전압발생장치  
Fig. 7. High-voltage power supply

교류전원과 EDLC를 에너지원으로 사용하는 X선 투시촬영장치용 32kW급 하이브리드 X선 제너레이터를 구성하고 PSIM을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 에너지저장장치의 등가회로는 그림 5와 같이 구성하였다. 시뮬레이션 파라미터는 표 3과 같으며, 각 에너지저장장치의 등가용량과 내부저항[3]은 표 4에 나타내었다. 표 4에서 전해커패시터 모듈은 EDLC 모듈과 출력특성을 비교하기 위하여 구성한 것이며, 제안한 X선 고전압발생장치에서 투시목적으로 사용하는 전해커패시터는 9,400μF이다.

표 3. 시뮬레이션 파라미터  
Table 3. Parameters for simulations

모드	관전압	관전류	조사시간
촬영모드	100kV	320mA	320ms
투시-촬영 모드	투시	100kV	40mA
	촬영	100kV	320mA
			16ms, 30PPS
			250ms

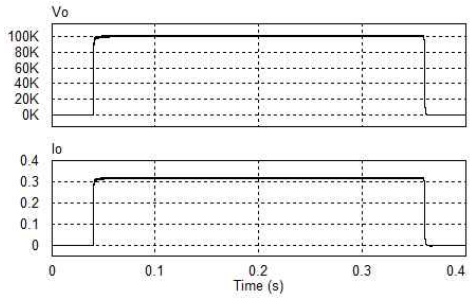
표 4. 에너지저장장치의 사양  
Table 4. Specifications of energy storage devices

사양	저장장치	
	전해커패시터	EDLC
Equivalent capacitance	0.2F	2.69F
Internal resistance	1.658mΩ	124.8mΩ

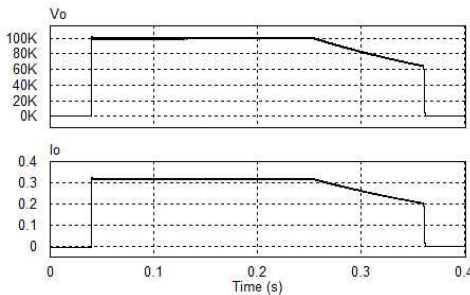
### 5.1 촬영 모드

그림 8은 X선 제너레이터의 촬영모드를 시뮬레이션한 결과이다. 출력전압과 전류는 100kV, 320mA이며, 조사시간은 320ms이다.

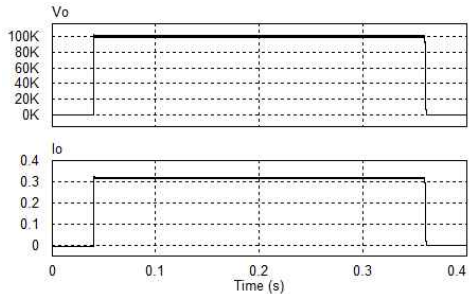
그림 8 (a)는 교류전원에서 에너지를 공급받는 경우로서 320ms동안 100kV, 320mA의 정상적인 출력을 내고 있다. 그림 8 (b)는 전해커패시터를 사용한 경우로서 220ms까지는 100kV, 320mA의 일정한 출력이 가능하지만 그 이후에는 출력전압 및 출력전류가 급격히 감소하였다. 그림 8 (c)는 EDLC를 에너지저장장치로 사용한 경우로서 교류전원을 사용할 때와 동일하게 320ms 동안 100kV, 320mA의 정상적인 출력이 가능함을 알 수 있다.



(a) 교류전원



(b) 전해커패시터

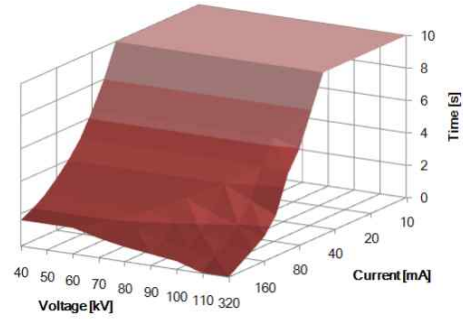


(c) EDLC

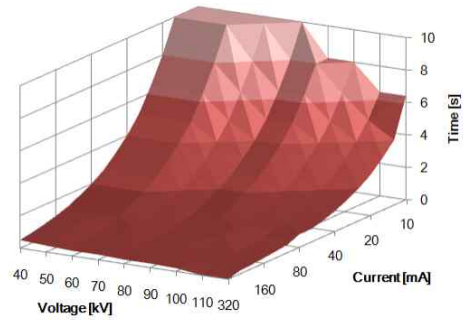
그림 8. 촬영모드 출력  
Fig. 8. Radiography output

교류전원과 각 에너지저장장치를 사용했을 때 X선 고전압발생장치의 다양한 부하조합에서의 최대 출력 시간을 그림 9에 나타내었다. X선 고전압장치의 최대 부하시간은 10초이며, X선 투시촬영장치의 최대 출력 시간은 출력전압과 출력전류 조건에서 X선관의 양극 허용온도에 의해 제한되는데 이를 X선관의 정격시간이라 한다.

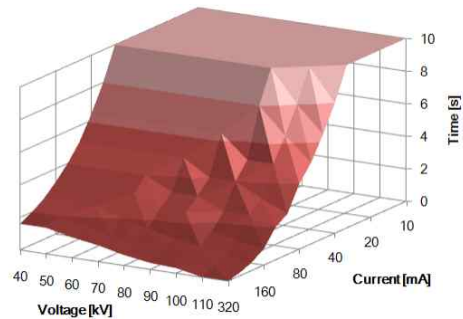
40kVA 교류전원을 사용할 때의 최대 출력시간은 그림 9 (a)와 같이 X선관의 정격시간과 동일하다. 전해커패시터는 그림 9 (b)와 같이 출력이 높아지면 충전에너지 부족으로 인해 부하시간이 크게 제한된다.



(a) 40kVA 교류 전원



(b) 전해커패시터



(c) EDLC

그림 9. 촬영모드에서의 최대 출력시간  
Fig. 9. Maximum output time of radiography mode

그림 9 (c)의 EDLC는 교류전원보다는 못하지만 전해 커패시터보다는 조사시간이 훨씬 길며 진단 목적의 X선 촬영에는 충분한 부하시간을 제공한다.

## 5.2 투시 - 촬영 모드

그림 10은 투시중 촬영을 모의하기 위하여 100kV, 40mA, 30 PPS 투시 중에 100kV, 320mA, 250ms 촬영



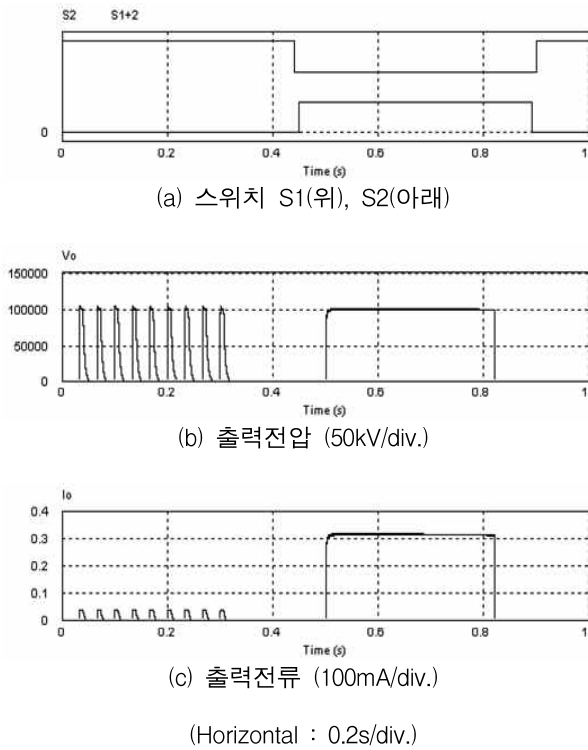


그림 10. 시뮬레이션 결과  
Fig. 10. Simulation results

을 수행했을 때의 스위치 조합과 출력전압 및 출력전류 파형이다. 스위치 S1, S2 조합에 의해 0.45초에 투시모드에서 촬영모드로 전환되어 X선 촬영을 수행하고 0.9초에 다시 투시모드로 복귀된다. 4kW의 투시 출력과 32kW의 촬영 출력이 정상적으로 수행됨을 알 수 있다.

## 6. 실증실험

제한한 X선 투시촬영장치용 32kW급 X선 고전압발생장치를 시뮬레이션과 동일한 사양으로 구성하고 실험을 수행하였다. 그림 11은 실험장치의 외관사진이다.

그림 12는 100kV, 40mA, 30 PPS 투시 중에 100kV, 320mA, 250ms 촬영을 수행했을 때의 실험결과이다. 그림 12 (a)에서 투시모드에는 스위치 S1이 켜진 상태이고, 촬영모드가 되면 S1이 꺼지고 S2가 켜져서 EDLC에서 에너지를 공급받는다. 그림 12 (b)는 투시



그림 11. 실험장치  
Fig. 11. Experimental setup

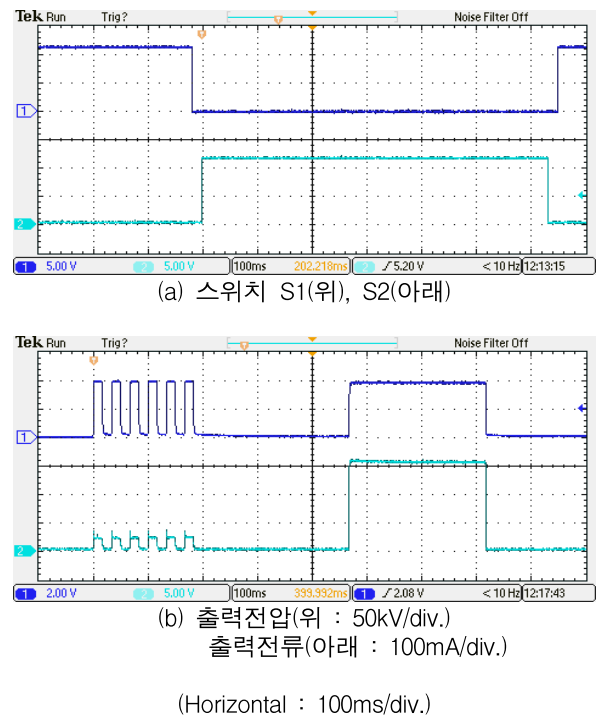


그림 12. 실험 결과  
Fig. 12. Experimental results

및 촬영에서의 관전압과 관전류 파형으로 투시와 촬영 모두 정상적으로 수행됨을 확인할 수 있다.

실험 결과에서 필라멘트 가열시간과 로터 가속시간을 확보하기 위하여 스위치 S1과 S2의 동작시점에 차이가 있는 것을 제외하면 시뮬레이션과 동일한 결과를 보여준다.

## 7. 결 론

본 논문에서는 에너지저장장치를 에너지원으로 하는 X선 투시촬영장치용 X선 제너레이터에 관하여 연구하고 교류전원과 EDLC를 에너지원으로 사용하는 하이브리드 방식의 X선 투시촬영장치용 하이브리드 X선 제너레이터를 제안하였다. 연축전지, 전해커패시터, EDLC의 전기적 특성을 기반으로 등가용량과 내부저항으로 구성된 에너지저장장치의 등가모델을 구성하고, 이를 이용하여 X선 투시촬영장치용 X선 제너레이터의 출력전압과 출력전력에 따른 각 에너지저장장치의 가용에너지 특성을 분석하였다.

에너지저장장치를 기반으로 하는 32kW급 X선 제너레이터를 구성하여 시뮬레이션과 실증실험을 수행하였다. 촬영모드에서 전해커패시터는 낮은 에너지 밀도 특성으로 인해 출력전압 및 출력전류가 감소하고 EDLC는 출력전압 및 출력전류가 정상적으로 출력되었다.

제안한 X선 제너레이터는 소전력의 투시모드에서는 교류전원으로부터 에너지를 공급받고, 대전력의 촬영모드에서는 EDLC에 충전된 에너지를 사용하여 X선 투시와 촬영이 가능함을 확인하였다. 제안한 X선 제너레이터를 사용하면 소전력의 전원설비로도 X선 투시촬영장치의 운용이 가능하므로 전원설비용량이 부족한 중소 병의원에서 수요가 증가할 것으로 기대된다.

## References

[1] T. F. Wu and J. C. Hung, "A PDM Controlled Series Resonant Multi-Level Converter Applied for X-Ray Generators", Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 1177-1182, 1999.

[2] Sung-Soo Kim and Joon Huh, "A Survey on Entrance Dose by Exposure Factors", Journal of Korean Society of Radiological Technology, Vol. 22, pp. 19-25, 1998.

[3] Young-Min Seo, Hee-Sun Kim, and Soon-Chan Hong, "Comparison of Energy Storage Devices for Diagnostic X-Ray Generator", Proc. of IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, pp. 2937-2942, 2012.

[4] Ying-Chun Chuang, "High-Efficiency ZCS Buck Converter for Rechargeable Batteries", IEEE Transactions on Industrial

Electronics, Vol. 57, No. 7, pp. 2463-2472, Jul. 2010.

[5] Y. Chen, H. Wu, M. Chou, and K. Lee, "Online Failure Prediction of the Electrolytic Capacitor for LC Filter of Switching-Mode Power Converters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 1, pp. 400-406, Jan. 2008.

[6] H. Jia, Y. Fu, Y. Zhang, and W. He, "Design of Hybrid Energy Storage Control System for Wind Farms Based on Flow Battery and Electric Double-Layer Capacitor", Proc. of Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, pp. 1-6, 2010.

[7] Shyh-Shin Liang and Ying-Yu Tzuo, "DSP Control of a Resonant Switching High-Voltage Power Supply for X-Ray Generators", Proc. of IEEE Power Electronics and Drive Systems Conference, pp. 522-526, 2001.

[8] W. D. Greason and J. Critchley, "Shelf-Life Evaluation of Aluminum Electrolytic Capacitors", IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology, Vol. 9, No. 3, pp. 293-299, Sep. 1986.

[9] John M. Miller, "Electrical and Thermal Performance of the Carbon-Carbon Ultracapacitor under Constant Power Conditions", Proc. of IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 559-566, 2007.

[10] L. Shi and M. L. Crow, "Comparison of Ultracapacitor Electric Circuit Models", IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp. 1-6, 2008.

[11] M. Bland, J. Clare, P. Zanchetta, P. Wheeler, and J. Prybyla, "A High Frequency Resonant Power Converter for High Power RF Applications", Proc. of Power Electronics and Applications, 2005 European Conference, pp. 1-10, Sep. 2005.

## ◇ 저자소개 ◇



**서영민**(徐永珉)

1974년 5월 5일생. 1997년 단국대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



**홍순찬**(洪淳瓚)

1950년 2월 24일생. 1973년 서울대 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1975~1978년 해군사관학교 교수부 전기공학실 전임강사. 1978년~현재 단국대 전자전기공학부 교수. 1986~1987년 미국 텍사스 A&M 대학교 방문교수. 1997~2000년 대한전기학회 이사. 2002년 전력전자학회 회장. 2002~2005년 단국대 공과대학 학장.