

고전압·대전류 pulse방전의 전압·전류특성에 관한 연구

서 길수, 조 국희, 김 영배, 이 형호
한국전기연구소 산업전기연구단 전기물리그룹

A Study on Voltage-Current characteristics of High-Voltage · Current Pulsed Discharge

Kil-Soo Seo, Kuk-Hee Cho, Young-Bae Kim, Hyeong-Ho Lee
Korea Electrotechnology Research Institute, Industry Applications Research Center

Abstract - In this paper, the arc resistance of INPIStrom is presented. It is need to the design of pulsed power system and simulation on the circuit of pulsed power system with INPIStrom switch. It is also possible to use this parameter to the part of discharge characteristics of Xenon lamp and the device with electrical discharge.

1. 서 론

펄스 전자 에너지기술로는 전계와 자계의 형태로 에너지를 저장, 정형, 전송, 변환하는 기술의 총칭이다. 펄스전자에너지는 순간적인 대전력이라는 특징을 갖는다. 이러한 특징을 발생하는 응용연구는 60~70년대에 X선, 핵융합, 플라즈마 등의 분야에서 시작해 80년대에는 재료, 가공 등의 분야로 확산되어 갔고, 90년대에는 생물, 환경 등의 분야에까지 발전했다. 펄스 파워발생장치를 이용한 응용분야는 하전입자빔, 고온고밀도 plasma, 전자가속, 고출력 microwave, 고출력 laser, soft x-ray, 중성 등 폭넓게 응용되고 있다.

펄스파워 제어기술의 핵심은 switching기술로써 정전 펄스 파워시스템에 이용되는 페스위치는 구조가 간단하고, 제어가 용이하여 pulsed power system에 가장 널리 애용되고 있다. 종래 spark gap은 수명이 짧고, 신뢰성이 떨어지기 때문에 이러한 조건을 만족시킬 수 없다. 더구나 빠른 상승시간, 대전류의 제어성, 빠른 회복시간(이것은 반복율에 영향을 미친다.), 높은 유지전압, 빠른 열 발산 및 각 부분의 손상을 최소화 등이 해결해야 할 문제이다. 중·대전류영역인 0.1~1[MA]에서 적합한 INPIStrom 개발을 위한 많은 노력이 high power 레이저 펄핑, EM추진기, MPD제어로켓과 같은 우주개발 응용분야에서 집중되어 있었다. 우주공간에서 스위치는 긴 수명을 가진(30년 동안 >10⁹회, 1Hz), 높은 신뢰성(1/10⁴ 이하의 고장율), high power의 전송(>10¹⁰V-A) 등의 이러한 조건을 갖추어야 한다.

또한 INPIStrom을 이용한 pulsed power 발생장치의 설계나 computer simulation을 위해서는 INPIStrom의 closing시 방전특성, 또한 펄스방전을 이용한 고출력 레이저, Xe 램프와 전원과 임피던스 매칭을 위해 방전특성을 등가회로 구할수있으면 편리하다. 그러나 switch가 단락하기 전에는 switch에 수십 kV에서 수백 kV가 걸려있고, switch가 단락후는 수십 V에서 수 kV까지 크게 변화하기 때문에 전압의 정확한 측정이 곤란하다. switch의 인덕턴스가 저항성에서 유도성으로 되기 때문에 구별이 어려워 지금까지 단락 switch의 특성은 명확하게 밝혀지지 않았다.

따라서 본고에서는 전압·전류파형, 회로방정식을 이용해 아크저항을 구하였다. 또한 기존 제시된 아크저항식과 비교하여 Rompe & Weizel, Toepler가 제시한 식과 잘 일치하는 것을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 이론

표 1은 지금까지 연구자들에 의해 연구되어 온 아크저항식, 시험조건 및 아크 성질의 가정을 수록한 것으로 실험식과 이론식이 같이 포함되어 있다.

표 1 아크저항 방정식

연구자(년도)	시험조건	아크의 성질 가정
Baraunik et al. [1] (1975)	$i \leq 10\text{kA}$, $d \leq 0.4\text{m}$, $P_0 \leq 12 \times 10^5 \text{Pa}$, Air, SF ₆ , N ₂ , Unipolar, 100ns pulse	(1) Arc 반경효과 포함 (2) 방사나 열손실 없음 (3) σ 는 일정 (4) T_e 는 일정 (5) 에너지 평형식
Demenik et al. [2] (1968)	$J = (0.3-15) \times 10^4 \text{ kA/m}^2$ $d = 0.006-0.3 \text{ m}$ $P_0 \leq 0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$, Xe, Unipolar, 1.3ms pulse	(1) Arc 반경효과 포함 (2) 모든 주열열 방사 (3) 약전리 (4) $\propto T_e^{3/2}$ (5) $T_e \propto \frac{I^{4/11}}{r^{2/11}}$
Goncharenko & Romanenko [3] (1971)	$i = 2-70\text{kA}$, $d = 0.001-0.02\text{m}$ $P_0 \leq 10^7 \text{Pa}$ Air, He $\frac{C_d}{\sigma_0^{2/3} r^{2/3} i^{1/3}}$	(1) Arc 반경효과 포함 (2) 방사나 열손실 없음 (3) $\sigma = \frac{\sigma_0 r}{t}$ (4) T_e 는 일정
Kushner et al. [4] (1985)	$J = 2 \times 104 \text{ MA/m}^2$ $d = 0.012\text{m}$ $P_0 \leq 0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ H ₂ , N ₂ , SF ₆ , Xe Unipolar, 100ns pulse	(1) Arc 반경효과 포함 (2) 방사나 열손실 없음 (3) 1-10 이온화 (4) $\propto T_e^{1/2}$ (5) $T_e \propto \frac{I^{4/5}}{r^{1/5}}$
Popovic et al. [5] (1974)	$d = 0.02\text{m}$, $P_0 \leq 0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ Air, CO ₂ , O ₂ , Ar, Xe Unipolar pulse	실험식
Rompe and Weizel [6] (1944)	$d \leq 0.035\text{m}$, $P_0 = (1-6) \times 10^5 \text{ Pa}$, Air Unipolar, 50ns pulse	(1) Arc 반경효과 무시 (2) 방사나 열손실 없음 (3) $\propto T_e$ (4) Te 의존 언급없음 (5) 에너지 평형식
Toepler [7] (1906)	$d = 0.009-0.0175\text{m}$ $P_0 = 10^5 \text{ Pa}$, Air	실험식
Vlastos [8] (1972)	$d = 0.13\text{m}$ (exploding wire restrike)	(1) Arc 반경효과 포함 (2) 방사나 열손실 없음 (3) 1-10% 이온화 (4) $\propto T_e^{3/2}$ (5) $T_e \propto \left[\int \frac{I^2}{r} dt \right]^{2/5}$ (6) 에너지 평형식

Braginskii는 아크채널의 반경은

$$r = 9.3 \times 10^{-6} \frac{i^{1/3} t^{1/2}}{\rho_0^{1/6}} \quad [m] \quad (1)$$

$$\frac{dU}{dt} + p \frac{d}{dt} [\pi r^2] = \frac{i^2}{\sigma \pi r^2} \quad (2)$$

여기서 Shock-front pressure

$$p = K \rho_0 \left[\frac{dr}{dt} \right]^2 \quad (2a)$$

Ratio of specific heats

$$U = \pi r^2 \frac{p}{\gamma - 1} \quad (2b)$$

식 (2)에 (2a)와 (2b)를 대입하면 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{2\pi^2 K \rho_0}{\gamma - 1} \left[r^4 \frac{dr}{dt} \frac{d^2 r}{dt^2} + \gamma r^3 \left[\frac{dr}{dt} \right]^3 \right] = \frac{i^2}{\sigma} \quad (3)$$

여기서 채널의 전도도 ρ 는 급격히 증가해 상수에 도달, shock-front 반경은 식 (4)의 형으로 주어진다고 가정하면

$$\gamma = f \text{ constant} \quad (4)$$

단열적인 팽창 때문에 ratio of specific heats는 식 (5)로 쓸 수 있다.

$$\gamma = \frac{f+2}{f} \quad (5)$$

여기서 f 는 가스중 자유도이다. $f=2$ 라고 하면 $\gamma=2$ 로 되므로 식 (3)을 다시 고쳐 쓰면

$$(2\pi^2 K \rho_0) r^2 \frac{dr}{dt} \left[r^2 \frac{d^2 r}{dt^2} + 2r \left[\frac{dr}{dt} \right]^2 \right] = \frac{i^2}{\sigma} \quad (6)$$

여기서 변수를 삼입하면

$$v = r^2 \frac{dr}{dt} \quad (7)$$

그러면 식 (6)은 식 (8)과 같이 된다.

$$(2\pi^2 K \rho_0) \frac{dv}{dt} = \frac{i^2}{\sigma} \quad (8)$$

식 (8)을 적분하면

$$v(t) = \left[\int_0^t \frac{i^2}{\pi^2 K \rho_0 \sigma} dt + v^2(0) \right]^{1/2} \quad (9)$$

식 (9)를 식 (8)에 대입해서 식 (7)을 적분하면 아크 채널의 반경에 대한 새로운 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$r(t) = \left[3 \int_0^t v(t) dt + r^3(0) \right]^{1/3} \quad (10)$$

$$= \left[3 \int_0^t \left[\int_0^t \frac{i^2}{\pi^2 K \rho_0 \sigma} dt + v^2(0) \right]^{1/2} dt + r^3(0) \right]^{1/3}$$

2.2 실험장치 및 결과

실험장치의 개략도를 그림 1에 나타낸다. 커패시터 (Aerovox사 제품)는 정격전압 10(kV), 정전용량 830(μ F)이다. INPIStrom의 절연물로 지지되고 진공펌프로 10^{-3} (Torr)까지 배기시키고 있다가, Closing 신호가 들어오면 전자밸브를 열어 INPIStrom내에 N_2 가스를 주입하게 된다. 그러면 INPIStrom의 절연과파전압은 그림 2에 나타낸 Paschen's curve의 pd값의 최소값의 좌측영역에서 우측으로 이동해 스위치를 닫히게 한다(9-11).

커패시터의 전압을 고전압 프로브를 이용해 측정하고, 전압이 저하하기 시작한 직전의 전압을 INPIStrom의 절연과파전압 V_b 로 했다. 아크전류 i 는 CT(Pearson Current Transformer)에 의해 측정했다. 부하에는 커패시터에 역전압방지 및 과전류를 억제하기 위해 피크에서 끊어질 수 있는 퓨즈를 달았다.

데이터의 해석방법으로서 아크저항 R_{arc} 는 그림 1의 회로방정식에 의해

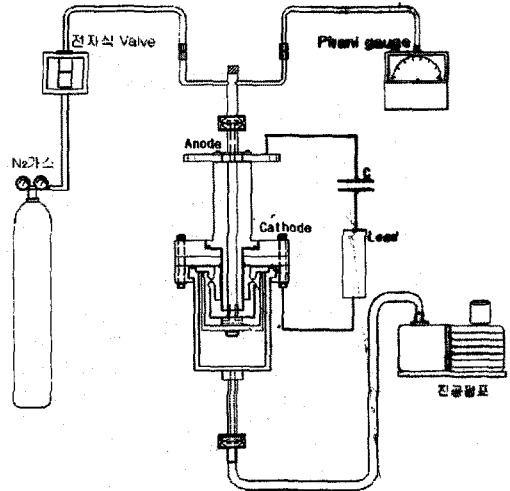


그림 1 실험장치의 개략도

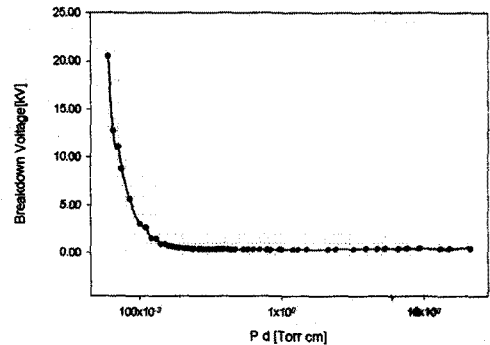


그림 2 INPIStrom의 Paschen곡선

$$R_a(t) = \frac{1}{i(t)} \left[V_b - \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt - \frac{d(L_0 + L_a(t))i(t)}{dt} - R_0 i(t) \right] \quad (11)$$

로 된다. 여기서 $R_0 \approx 30$ (m Ω), $C = 8,300$ (μ F), $L_0 \approx 20$ (nH), L_a 는 각각 회로의 저항, 커패시터의 정전용량, 인덕턴스, INPIStrom을 제외한 회로의 인덕턴스이다. 아크저항에 의한 아크전압 V_a 는 $R_a(t)i(t)$ 에 의해 계산된다. L_0 는 INPIStrom의 구조에 의한 것으로 정확하게 계산된다. 시간에 따른 INPIStrom의 아크 인덕턴스 L_a 는

$$L_a(t) = 2 \times 10^{-9} \int_0^t \left[V_2 \ln \frac{R_0}{r} + V_z \frac{r z_t}{R_0^2} \frac{z V_r}{r} \right] dt \quad (12)$$

로 된다. 따라서 식 (12)를 식 (11)에 대입하면 시간에 따른 아크저항 $R_a(t)$ 를 구할 수 있다.

$$R_a(t) = \frac{1}{i(t)} \left[V_b - \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt - \left\{ L_0 + 2 \times 10^{-9} \left[V_2 \ln \frac{R_0}{r} + V_z \frac{r z_t}{R_0^2} \frac{z V_r}{r} \right] \right\} \frac{di(t)}{dt} - R_0 i(t) \right] \quad (13)$$

로 된다. 그림 3은 커패시터뱅크에 6(kV)를 충전한 다음 closing 시켰을 때 시간에 따른 전압, 전류 및 저항치를 나타낸 것이다.

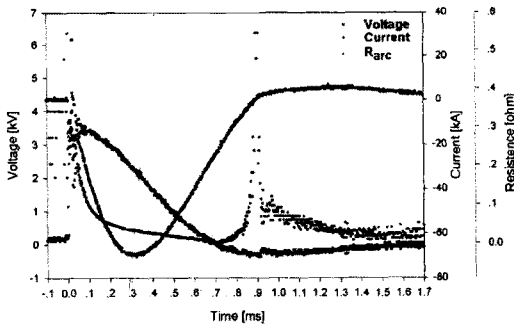


그림 3 아크전류, 전압 및 저항의 시간적인 변화

시간에 따른 저항은 0.1[ms]내에 급격히 저하해서 0.1~0.01[Ω]내에서 완만하게 저하한다.

그림 4는 INPIStrom의 아크저항에 의한 아크전류와 전압과의 관계를 나타낸 것이다. 전압-전류고선은 리사슈도형의 1/2만이 나타나고 원점으로 수렴하는 특성을 보인다. 그림 4에서는 곡선에 따라 스위치의 동작을 다음과 같은 3단계로 구분할 수 있다.

- (1) Closure 또는 스위치 전도 상태의 개시
- (2) 전도 또는 rundown 상태
- (3) 회복(recovery) 또는 개 상태(opening phase)

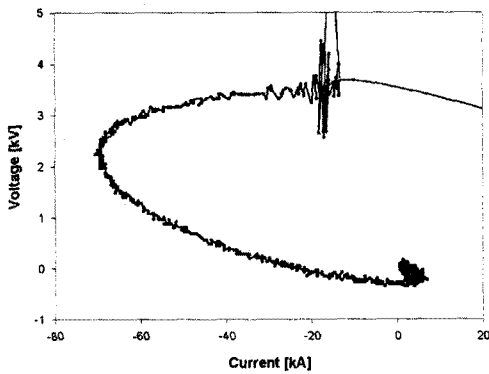


그림 4 아크전압 V_a 와 전류 i 의 관계

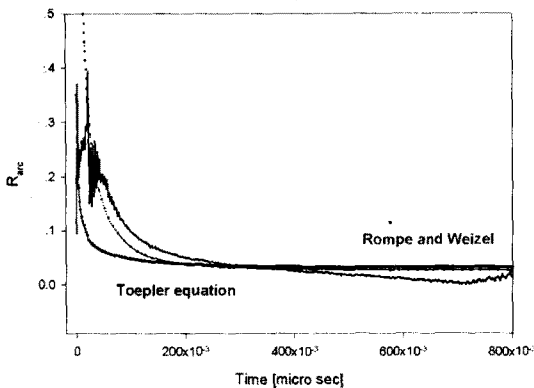


그림 5 Toepler 및 Rompe의 식으로 계산된 아크저항과 실측한 값과의 비교

그림 5는 실측된 INPIStrom의 실측된 아크저항과 Toepler 및 Rompe & Weizel 식으로 계산된 값을 서로 비교한 것이다. 많은 아크저항 특성을 연구한 연구자들이 제안한 아크저항방정식에 따라 시간에 따른 저항의 특성

을 Rompe & Weizel, Toepler 및 Vlastos가 제시한 실험식

$$\frac{cd}{\left[\int_0^t i^n dt \right]^m} \quad (14)$$

잘 일치하는 것으로 나타났다. 특히 INPIStrom의 아크저항은 Toepler의 아크저항식과 잘 일치하는 것을 볼수 있었다. 여기서 $d=0.01[m]$, $C=10$ 으로 했다.

3. 결 론

INPIStrom을 이용한 펄스파워전원장치 설계 및 펄스 파워회로의 simulation에 필요한 switch의 등가회로 모델을 시간에 따른 아크저항을 전압·전류 펄스파워회로를 고려하여 구하였다. 또한 기존에 제시한 아크저항식과 비교하여 Rompe & Weizel, Toepler 및 Vlastos가 제시한 실험식과 유사한 특성을 갖는다는 것을 볼수있었으며, 특히 INPIStrom은 Toepler 아크저항과 잘 맞는다는 것을 확인하였다.

향후 이러한 기법을 이용하여 펄스방전을 이용하는 부하에 등가회로 값을 구할 수 있으므로 전원과 부하간의 임피던스 매칭에 이용하면 유용하리라 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. I. Barannik et al., "Resistance and inductance of a gas arc" Sov. Phys.-Tech.Phys., Vol 19, pp. 1449-1453, May 1975.
- [2] I. V. Demenik et al., "Resistance of Xenon plasma in a large flash lamp," Sov.Phys.-Tech Phys., vol 13, pp.829-832, Dec.1968.
- [3] G. M. Goncharenko and I.N.Romanenko, "Discharge channel in helium at 100atm and in air," Sov.Phys.-Tech.Phys., vol. 15, pp. 1990-1995, June 1971
- [4] M. J. Kushnner et al., "Arc resistance of laser triggered spark gaps," J.appl. Phys., vol.58, pp.1744-1751, sept. 1985
- [5] M. M. Popovic et al., "Investigation of the beginning of high current discharges in pulsed arcs," in Proc. Int. Conf. Gaseous Discharges, 1974, pp. 32-36
- [6] R. Rompe and W.Weizel, "Uber das toeplersche funkengesetz,"Z..Phys., vol.122, pp.636-639, 1944
- [7] M. Toepler, "Zur kenntnis der gesetz der gleitfunkenbildung,"Ann. Phys. D., 4 folge, bd 21,pp.193-222, 1906
- [8] A. E. Vlastos, "The resistance of sparks,"J.Appl.Phys., vol. 43, pp. 1986-1989., Apr. 1972.
- [9] 서길수, 김영배, 이형호, 제환영, "전기 Triggering형 고전압 대전류 INPIStrom 설계기술 개발", 춘계 방전 및 고전압연구회, pp75~78, 99. 5.8
- [10] 서길수, 김영배, 이형호, "고전압/대전류 투입스위치의 최적설계기술", '99 전기학회 하계학술대회 DHO 7, pp. 2173~2175, '99. 7.19-21
- [11]K.S.Seo, Y.B.Kim, K.H.Cho, H.H.Lee "Development of Pulsed Power System with 500kA Current" Proceedings of 1999 Japan-Korea Joint Symposium on Electrical Discharge and High Voltage Engineering, pp 29~32, 1999