

초고압 차단기용 코일건 타입 조작기의 기술적 타당성 검토

論 文
55C-7-7

Feasibility Study of Coil Gun Type Actuator for High Voltage Circuit Breaker

曹柱鉉[†] · 李弘植^{*} · 金錫煥^{**} · 金永培^{***} · 李佑暎[§] · 金烘樺^{§§}

(Chu-Hyun Cho · Hong-Sik Lee · Seog-Whan Kim · Young-Bae Kim · Woo-Young Lee · Hong-Kyu Kim)

Abstract - A novel coil gun type actuator has been proposed and tested for its possibility as an actuator for a high voltage circuit breaker by experimental method. The 20kJ capacitor bank with the electrolytic condensers was charged up to 500V and discharged to a couple of 100 turn coils connected with parallel through a thyristor switch. The repulsive force between coil and the actuator made by copper conductor of 20kg reached up to 23,000 N, and over 800J of energy was transferred to the kinetic energy of the conductor. The experimental results showed that the coil gun type actuator has a good possibility for the high voltage circuit breaker.

Key Words : 유도형 코일건, 초고압 차단기, 차단기 조작부, 액츄에이터, 전해콘덴서

1. 서 론

현재의 초고압 차단기는 유압조작기, 공압조작기 및 스프링 조작기가 주로 사용되고 있다. 이러한 기계식 조작기는 오동작 및 소음, 누유, 마찰 등의 기계적 문제를 가지고 있고, 차단기 고장의 주된 원인이 되고 있다.

최근에 영구자석 또는 전자석을 이용하여 전자력으로 차단기 동작에 필요한 조작력을 얻는 방식이 연구되고 있다. 이 방식은 능동적으로 부하에 대처할 수 있다는 장점이 있어서 기존의 기계식 조작기를 대체할 새로운 방법으로 기대되고 있다. 그러나 이 방식은 조작거리가 비교적 짧은 단점이 있어서 큰 조작거리가 요구되는 초고압 차단기에 적용하는 데에는 어려움이 있다. 또한 자성체의 포화효과로 인하여 큰 조작력을 얻는 데는 한계가 있다. 영구자석이나 전자석을 사용하는 것의 단점인 조작력의 한계를 극복하기 위해서 순수 도체만을 이용하여 전자력을 얻는 방식이 본 연구에서 제안하는 코일건 타입의 조작기이다. 이 방식은 자성체를 사용하지 않으면서 코일에 펄스 전류를 흘릴 때 발생하는 코일과 도체사이의 반발력을 이용하는 방식이다[1, 2].

본 연구는 코일건 타입의 액츄에이터가 기존의 기계식 조작기를 대체할 수 있는지의 여부를 판단하기 위해서 필요한 기술적 가능성의 검토를 목적으로 하였다.

2. 코일건의 원리

그림 1에 single stage 유도형 코일건의 모형을 나타내었다. 유도형 코일건의 원리는 코일에 흐르는 전류와 그 전류의 시간적 변화에 의해서 발생하는 자기장의 시간적 변화가 도체표면에 유기하는 와전류사이의 반발력에 의해서 물체를 가속한다.

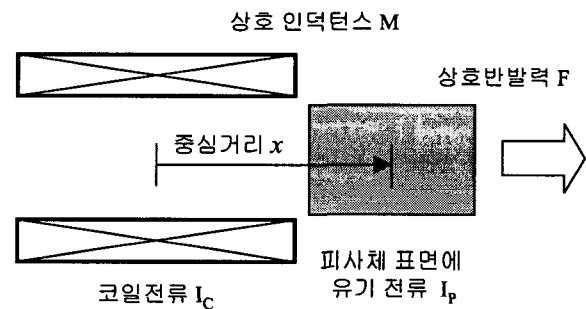


그림 1 Single stage 유도형 코일건의 모형
Fig. 1 A model of the single-stage inductive coilgun

그림 1에 나타낸 모형에서 코일과 도체 사이에 발생하는 반발력은 식 (1)로 주어진다[1].

$$F = I_C \cdot I_P \left(-\frac{dM}{dx} \right) \quad (1)$$

상호인덕턴스는 그림 1의 모델에서는 x 가 증가할수록 작아진다. 그 변화율의 최대치는 x 가 (코일길이+피사체 길이) $\times 1/2$ 이 되는 지점, 즉 피사체의 뒤쪽 끝이 코일의 끝을 막 벗어나는 순간이다.

[†] 교신저자, 正會員 : 韓國電氣研究院 先任研究員 · 工博
E-mail : cho@keri.re.kr

^{*} 正會員 : 韓國電氣研究院 責任研究員 · 工博

^{**} 正會員 : 韓國電氣研究院 先任研究員 · 工博

^{***} 正會員 : 韓國電氣研究院 先任技術員

[§] 正會員 : 韓國電氣研究院 責任研究員

^{§§} 正會員 : 韓國電氣研究院 先任研究員 · 工博

接受日字 : 2006年 3月 21日

最終完了 : 2006年 4月 15日

3. Single-stage 유도형 코일건의 제작 및 실험

3.1 차단기 조작부의 요구조건을 만족하기 위한

코일건의 설계

본 연구에서 설정한 목표는 72.5kV, 20kA의 GCB의 조작부 구동을 위한 코일건의 제작이다. GCB의 동작을 위한 조작부의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 차단기 조작부 기준 파라미터

Table 1 A criterion of the actuator for high-voltage switchgear

차단기 파라미터	기준치
조작대상 질량	21.5 kg
조작거리	128 mm
조작시간	< 35 ms
조작속도	v_max = 10 m/s, v_av = 6 - 7 m/s
마찰포함 최대 조작력	20,000 N
소요 조작 에너지	700 J
충전전압	500 V

코일건의 에너지 변환 효율은 매우 낮은 편이어서 최대 4%의 정도의 효율이 보고되어 있다 [2]. 따라서 700J의 조작에너지를 얻기 위해서는 17.5kJ의 투입에너지가 필요하게 된다. 충전전압을 500V로 한다면 필요한 커패시턴스는 140 mF 이다.

기존의 펄스파워용 고전압 커패시터를 사용한다면 비용과 차지하는 공간이 지나치게 과도하여 현실성이 없게 된다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 사용전압이 낮고 정전용량이 큰 전해콘덴서를 사용하였다.

또한, 종래의 multi-stage 코일건의 이동자계에 의한 가속은 초기의 힘이 약해서 큰 관성이 있는 물체를 가속하기 어렵고, 부하의 변동에 의한 이동자계와 도체간의 슬립이 발생하면 가속이 어렵다는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 single-stage 유도형 코일건 방식을 이용하여 초기에 큰 힘으로 가속하여 관성에너지를 활용하는 방식을 도입하여, 코일과 도체간의 유도반발력을 활용하는 방식을 채택하였다.

3.2 코일건 전원 구성

그림 2에 코일건 구동용 방전 회로도도를 나타내었다. 전해 콘덴서는 용량 15,000uF(RWF 350LG, 삼영전자)의 커패시터를 직병렬 연결(2직렬*33병렬)하여, 전체 247.5mF, 30 kJ의 커패시터 뱅크를 구성하였다. 방전용 스위치로서는 싸이리스터 스위치 (5STP24H2800, ABB)를 사용하였다. 전해 콘덴서는 고유한 극성을 가지고 있어서 역방향 충전 시 파손의 위험이 있으므로 그림 2와 같이 다이오드(5SDD24F2800, ABB)를 삽입하여 역방향 충전을 방지하는 크로바(crowbar) 모드를 채용하였다. 입력은 단상 220V를 사용하여 승압하고 정류하여 커패시터를 충전한다.

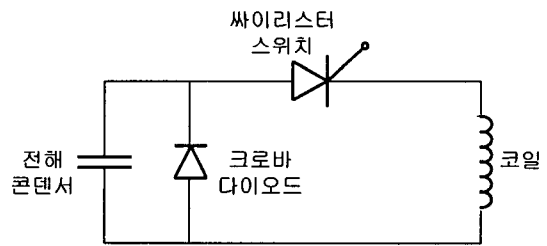


그림 2 전해콘덴서와 싸이리스터를 이용한 single-stage 코일건 용 방전 회로도

Fig. 2 Discharge circuit for single-stage coilgun using the electrolytic condensers with Thyristor switch

3.3 코일건 최적 권선수 도출을 위한 시뮬레이션

Single-stage 유도형 코일건의 가속효율을 최대로 하기위해서는 코일 및 도체의 기하학적 구조 및 전류의 변화 등의 많은 파라미터를 조합하여 수치해석 하여야한다. 코일건의 발사 과정의 시뮬레이션을 위해 피투사체를 여러 개의 절연된 단락코일로 나누어져 있는 것으로 가정하고 등가회로 방정식을 세운다. 등가회로 방정식과 피투사체의 운동 방정식을 Runge-Kutta 방법으로 해석하면 시간에 따른 피투사체의 위치와 속도, 구동코일의 전압, 전류의 변화를 구할 수 있다. 각 단의 등가회로 방정식과 피투사체의 운동 방정식은 식 (2) 에서 식 (5)와 같이 된다. 즉, 발사 시뮬레이션은 이 방정식을 Runge-Kutta 방법으로 해석하여 시간에 따른 피투사체의 위치와 속도, 구동코일의 전압, 전류를 구하는 것이다.

$$\{[L_i] + [M_i]\} \frac{d}{dt} [I_i] = [V_i] - [R_i][I_i] - v_p [G_i][I_i] \quad (2)$$

$$[C_i] \frac{d}{dt} [V_{\alpha}] = -[I_{\alpha}] \quad (3)$$

$$M_p \frac{dv_p}{dt} = \frac{1}{2} [I_i]^T [G_i][I_i] \quad (4)$$

$$\frac{dx}{dt} = v_p \quad (5)$$

$$[G_i] = \frac{d}{dx} [M_i] \quad , i = 1, 2, 3, \dots, n$$

여기서 x 는 피투사체의 위치, M_p 와 v 는 피투사체의 질량 및 속도이고, i 는 코일의 번호를 나타낸다. $[L_i]$, $[M_i]$, $[R_i]$, $[I_i]$, $[V_{\alpha}]$ 는 코일의 자기인덕턴스 행렬, 상호인덕턴스 행렬, 저항 행렬, 전류 행렬 그리고 커패시터의 전압 행렬을 나타낸다.

본 연구에서는 위와 같은 수치해석 기법을 이용하여 커패시터로 구동되는 single-stage 유도형 코일건(single-stage inductive coil gun)을 해석하여 코일건 제작에 필요한 파라미터를 구하였다. Single-stage 유도형 코일건의 에너지 전달을 최대로 하기위해서는 전원 장치의 특성과 코일의 기하학적 구조와 피투사체의 질량 등이 최적화 되어야한다. 즉, 방전회로의 인덕턴스가 지나치게 작은 경우 전류의 진동에 의한 자기장이 피투사체를 가속, 감속을 되풀이하게 되어

결국 에너지 전달이 효율적으로 이루어지지 않게 된다. 피투사체가 자기장의 실질적인 영향력을 벗어나는 동안 전류는 상승하는 과정에 있는 것이 바람직하다.

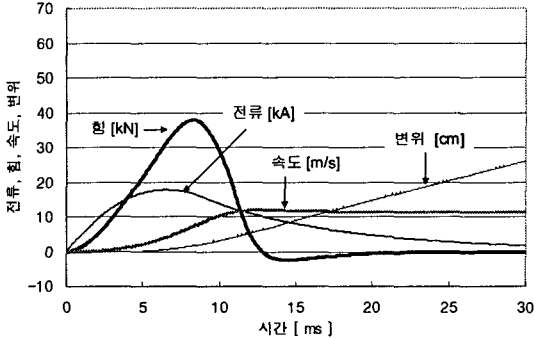


그림 3 코일의 턴 수 25턴의 경우 방전전류, 힘, 속도 및 변위
 Fig. 3 A discharge current, force, velocity and displacement in case of the 25-turn coil

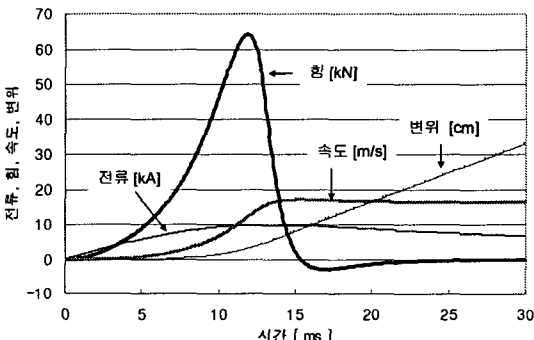


그림 4 코일의 턴 수 50턴의 경우 방전전류, 힘, 속도 및 변위
 Fig. 4 A discharge current, force, velocity and displacement in case of the 50-turn coil

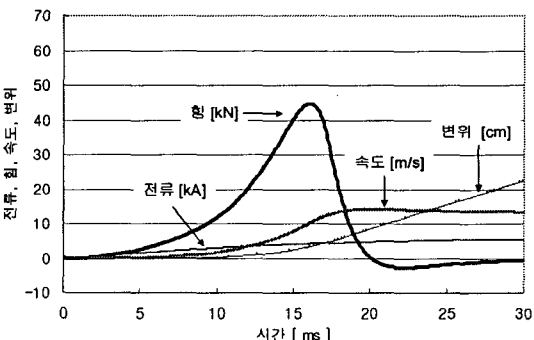


그림 5 코일의 턴 수 100턴의 경우 방전전류, 힘, 속도 및 변위
 Fig. 5 A discharge current, force, velocity and displacement in case of the 100-turn coil

본 연구에서는 피투사체인 구리도체의 질량을 차단기 조작부의 실제 중량과 유사한 20kg으로 고정하였다. 또한 도체의 기하학적 구조는 차단기 조작부의 실제 사이즈를 감안

하여 $\phi 120 \times 200$ mm로 고정하였다. 이와 같이 피투사체의 물리적 상수를 고정하고 코일의 턴 수 변화에 따른 전류파형의 변화 및 발생하는 힘과 피투사체가 갖는 속도와 변위 등을 계산하여 그림 3, 그림 4, 그림 5에 각각 나타내었다.

코일의 턴 수 증가에 따라서 전류의 최대치가 감소하고 있으며, 따라서 최대의 힘이 발생하는 시간도 늦추어지고 있음을 알 수 있다. 에너지 전달 결과를 나타내는 피투사체의 속도는 그림 4의 50턴의 경우가 가장 크게 나타났다. 이는 중량 20kg의 피투사체와 코일의 턴 수 50턴의 방전전류의 형태가 가장 효율적으로 에너지를 전달하는 결과로 해석된다.

3.4 Single-stage 코일건의 제작 및 실험

그림 6은 시뮬레이션 결과를 바탕으로 제작된 코일 및 지지대의 개략도를 나타낸 것이다. 코일은 초기에 큰 힘을 얻기 위해서 도체의 바닥 면과 측면을 감싸는 방식으로 제작되어 2단으로 제작하였다. 각단의 턴 수는 100으로 하여 병렬로 연결하여 50턴의 효과를 내면서 코일의 저항을 줄이도록 하였다. 코일은 제작의 용이성 등을 감안하여 0.1 ϕ , 2000가닥의 Litz-wire를 사용하였다. 코일 및 전해콘덴서의 방전특성을 고려한 시스템 전체의 등가 인덕턴스는 약 200 μ H로 계산되었다.

피투사체인 구리도체는 코일에 의해서 가속되어 가이드를 따라서 수직상승한 후에 자유낙하하고 베이스에 설치된 공기완충기에 의해서 안전하게 제자리로 돌아오도록 장치를 구성하였다. 이와 같은 방식을 통하여 도체에 전달된 에너지를 도체의 상승 높이로부터 손쉽게 측정할 수 있었다.

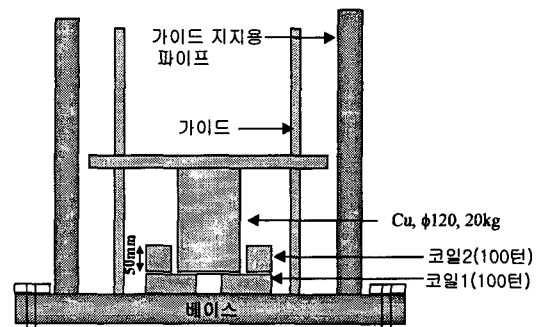


그림 6 코일 및 피투사체의 운동 가이드 (높이 4m)
 Fig. 6 A schematic design of the coil and the guide (height : 4m) for the moving conductor

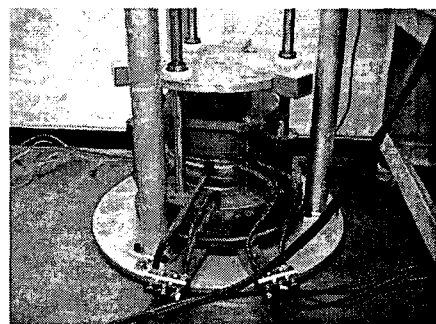


그림 7 제작된 코일 및 지지대의 사진
 Fig. 7 The picture of the coil and guide manufactured

그림 6과 그림 7에 나타난 실험 장치는 도체의 도약 높이가 4m로 제한되어 30kJ의 에너지를 방전하기 어렵고, 20kJ의 에너지로 차단기 조작부 동작에 필요한 힘을 얻을 수 있었다. 그림 8은 0.165F의 캐패시터에 500V 충전하여(충전에너지 20kJ) 제작된 코일에 방전했을 때의 전압과 전류의 파형을 나타낸다. 전압은 크로바 다이오드의 작용으로 전해콘덴서에 역방향으로 충전되는 것이 억제되며, 전류는 최대치가 약 11kA에 이르고, 크로바 다이오드의 역할로 하강이 완만해지는 형태를 갖게 된다. 이와 같은 방전전류의 특성은 도체를 감속시키는 작용을 약화시키므로 에너지 전달 효율을 높이는 결과로 이어진다. 전류가 최대치까지 상승하는 시간은 약 8ms로 나타났다.

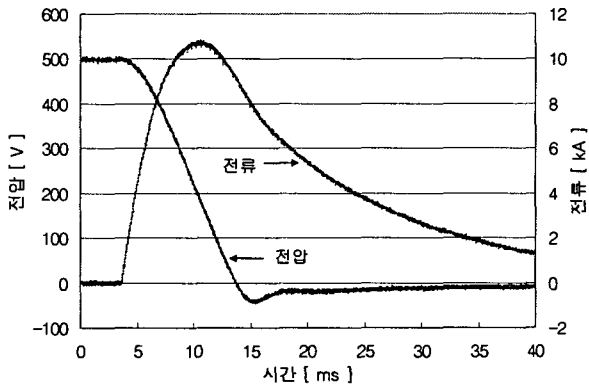


그림 8 코일건 구동용 전압전류 파형
Fig. 8 Discharge waveform for coilgun driving

실제로 도체에 전달되는 힘을 계산하기 위해서 고속카메라를 이용한 도체의 변위를 세밀하게 측정하였으며, 그 결과를 그림 9에 나타내었다. 도체는 실질적으로 8ms 동안 가속되고 그 후는 중력에 의한 감속효과만 나타나게 된다. 가속되는 시간동안의 세밀한 변위를 그림 10에 나타내었고, 그림 10의 그래프의 추세선을 수식화하면 식 (6)과 같다.

$$h = 580.07t^2 - 0.3156t \quad (6)$$

마찰에 의한 손실을 무시하고, 중력가속도를 감안하여 식 (6)으로부터 20kg의 도체에 작용하는 힘을 식(7)과 같이 계산할 수 있다.

$$F = (d^2h/dt^2 + 10) \times 20 = 23,400 \text{ [N]} \quad (7)$$

식(6)과 식(7)로부터 도체는 8ms 동안 23,400N의 힘으로 가속되고 있음을 알 수 있다. 따라서 코일로부터 도체에 전달된 에너지는 식(8)과 같다.

$$E = F \cdot H = 23,400 \times 0.035 = 819 \text{ [J]} \quad (8)$$

투입된 에너지는 20.625 kJ이며 도체에 전달된 에너지는 819 J이므로 에너지 전달 효율은 3.97%로 계산된다. 피투사체와 가이드의 마찰에 의한 손실을 감안하면 실질적인 에너지전달 효율은 4%를 약간 넘는 것으로 추정된다.

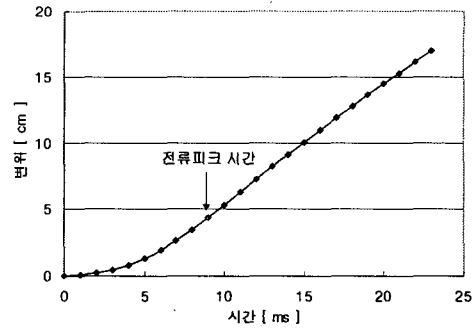


그림 9 피투사체의 시간에 따른 수직 변위
Fig. 9 Vertical displacement of the conductor as a function of time

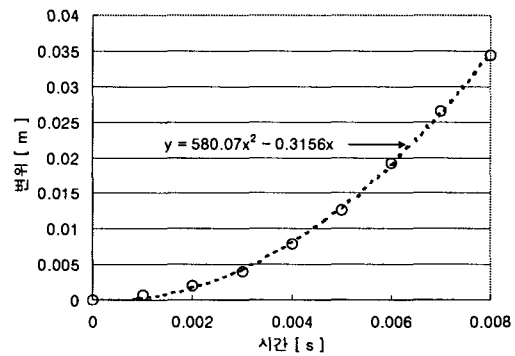


그림 10 가속구간의 시간에 따른 변위
Fig. 10 Vertical displacement of the conductor as a function of time within accelerating period

4. 차단기 조작부로서의 기술적 타당성 검토

코일건 방식의 조작부가 차단기 조작부로서의 적용이 가능한지의 판단을 위한 주요한 기술적 요구사항과 본 연구에서 달성한 값들을 표 2에 나타내었다. 가장 중요한 파라미터인 조작력과 조작에너지는 요구조건을 충분히 달성하고 있으며, 조작시간 및 조작거리에 대해서는 본 연구에서 시도한 single-stage 유도형 코일건에서는 초기의 큰 조작력이 관성의 힘으로 전달되는 형태이므로 실제 부하에서의 테스트가 필요한 부분이다. 그러나 원리상으로는 조작거리에 크게 구애받지 않는다.

표 2 차단기 조작부로서 요구되는 기준치와 본 연구에서의 달성치 비교

Table 2 Comparison between the criterion of the actuator for high-voltage switchgear and experimental results

기술적 요구사항	기준치	달성치
마찰포함 최대 소요조작력 : N	20,000	23,400
최대 조작속도 [m/s]	10	9.5
평균조작속도 [m/s]	6 ~ 7	7.5
소요조작에너지 [J]	~700	~ 800
조작시간 [ms]	< 35	<20 (실부하 실험 필요)
조작거리 [mm]	128	실부하 실험 필요

차단기 실제동작은 O-C-O(Open-Close-Open) 동작의 사이클로 이루어져 있으므로 연속적인 3개의 동작이 필요하다. 본 연구에서는 표 2에 나타낸 기준치를 달성하기 위해서는 20kJ의 충전에너지로도 가능함을 알 수 있었다. O-C-O 동작의 구현을 위한 기본적인 개념도는 그림 11과 같다. 차단기는 Open 동작에 소요되는 에너지가 크고, Close동작에는 약 절반정도의 에너지가 소요됨을 감안하면 O-C-O 동작의 구현을 위해서는 50kJ의 에너지가 필요할 것으로 추정된다. 각각의 모듈은 한 가지의 동작을 담당하고, 모두 싸이리스터 스위치에 의해서 제어된다. 기본적 구조는 그림 11에 나타낸 바와 같이 스트로크의 끝에 해당하는 양쪽 편에 코일을 설치하여 도체를 움직이고, 그 힘은 절연체를 통하여 차단부로 전달되도록 한다.

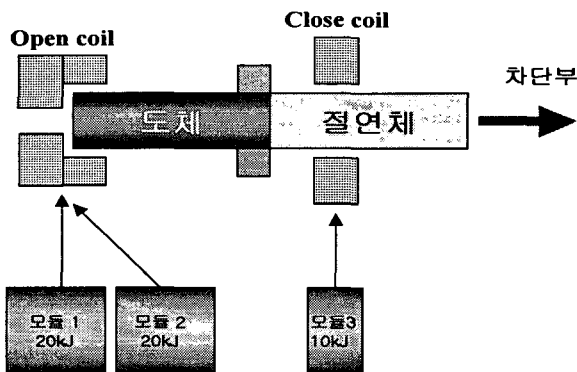


그림 11 O-C-O 동작 구현을 위한 시스템 개념도
 Fig. 11 A conceptual design for O-C-O operation of the actuator for high-voltage switchgear

5. 결 론

본 연구는 single-stage 유도형 코일건 방식의 차단기 조 작부 액츄에이터를 제안하여 그 기술적 가능성을 검토하였 다. 본 연구에서 제안한 single-stage 유도형 코일건은 종래 의 코일건 방식에 비해서 초기 가속력이 크고 구조가 간단 하며, 자성체를 사용하지 않으므로 발생하는 힘에 있어서 제 한이 없고, 종래의 고전압 커패시터에서 전해콘덴서를 사용 하는 방식을 도입하여 경제성 및 동작효율을 대폭적으로 개 선하였다. 그 결과 차단기 조작부로서의 가능성에 있어서 힘과 에너지 등에서 차단기의 요구조건을 충족하고 있으며, 제어의 용이성과 정전대책, 전해 콘덴서 등 부품의 수명과 관련한 유지보수 주기, 동작의 신뢰성 등은 실증적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] H. Kolm, and P. Mongeau, " Basic Principles of Coaxial Launch Technology ," IEEE Trans. Magnetics, Vol. 20, No. 2, pp 227-230 March 1984.
 [2] Seog-Whan Kim, Song-Yop Hahn and Hyun-Kyo Jung, "Optimal Design of Multistage Coilgun," IEEE

Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 2, March 1996, pp 505-508.

저 자 소 개



조 주 현 (曹柱鉉)
 1966년 1월 29일생. 1989년 한양대 공대 전 기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학 과 졸업(석사). 2004년 長岡技科大 에너지환 경 졸업(박사). 1996~현재 한국전기연구원 선임연구원
 Tel : 055-280-1420
 Fax : 055-280-1433
 E-mail : cho@keri.re.kr



이 홍 식 (李弘植)
 1975년 서울대 공대 전기과 졸업. 1983년 동 대학원 전기과 졸업(석사). 1990년 동 대 학원 전기과 졸업(박사). 1979년~현재 한국 전기연구원 책임연구원
 관심분야 : 펄스파워, 초고주파
 Tel : 055-280-1401
 Fax : 055-280-1433
 E-mail : hslee@keri.re.kr



김 석 환 (金錫煥)
 1964년 1월 12일 서울 출생. 1986년 서울대 학교 전기공학과 졸업. 1988년 서울대학교 전기공학과 석사. 1993년 서울대학교 전기 공학과 박사. 1993년 기초전력공학공동연구 소 연구원. 1994~1996 일본 고에너지물리 학연구소 연구원. 1997~1999 유럽 CERN 연구소 연구원. 2000~2001 미국 Fermi 연 구소 연구원. 현재 한국전기연구원 선임연 구원.
 Tel : 055-280-1662
 Fax : 055-280-1075
 E-mail : swkim@keri.re.kr



김 영 배 (金永培)
 1957년 2월 2일생. 1978년 부산공전 전기공 학과 졸업. 현재 한국전기연구원 선임기술원
 Tel : 055-280-1535
 H.P : 011-878-0983
 E-mail : ybkim@keri.re.kr



이 우 영 (李 佑 暎)

1957년 10월 2일생. 1980년 경북대 전자공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전자공학과 졸업 (석사). 1982년~현재 한국전기연구원 책임연구원

Tel : 055-280-1572

Fax : 055-280-1589

E-mail : wylee@keri.re.kr



김 홍 규 (金 烘 榑)

1969년생. 1995년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학부 졸업 (석사). 2001년 동 대학원 전기공학부 졸업 (공학). 현재 한국전기연구원 선임연구원

Tel : 055-280-1568

Fax : 055-280-1589

E-mail : kimhk@keri.re.kr