

## 동적모델에 기반한 고압회로차단기의 설계 및 해석

권병희\* · 안길영\* · 오일성\* · 서정민\* · 김수현\*\*

### Design and Analysis of Power Circuit Breaker Mechanism Based on the Dynamic Model

B. H. Kwon\*, K. Y. Ahn\*, I. S. Oh\*, J. M. Seo\* and S. H. Kim\*\*

**Key Words :** Vacuum Circuit Breaker(진공 회로차단기), Dynamic Model(동적모델), Energy Flow(에너지흐름), Concept Design(개념설계), High-Speed Camera(고속카메라).

#### Abstract

In this paper, based on the developed dynamic model of a vacuum circuit breaker mechanism, the development of the new circuit breaker with less energy mechanism is focused. The energy flow analysis of the original mechanism is carried out to show where the elastic potential energies of pre-loaded springs are transmitted. Through energy flow analysis, the concept design of the new circuit breaker with less energy mechanism is proposed, and then the detailed design is carried out through the design process based on the verified dynamic model. Comparing simulation results with experiment using a high-speed camera, the appropriateness of the proposed design procedures for the rapid circuit breaker mechanism is shown.

#### 1. 서론

고전압과 고전류가 흐르는 송배전 계통에서 과전류, 단락 등에 의한 사고 발생시에 그 파급효과를 최소화하기 위하여 개폐기인 고압 회로차단기(power circuit breaker)를 사용한다<sup>(1)</sup>. 현재 사용되는 고압 회로차단기는 여러 형태로 발전되어 왔으며 회로 접점의 개폐시에 발생되어지는 아크(arc)의 소호매질에 의해 공기, 자기, SF6 가스, 진공 차단기 등으로 분류되고 있다<sup>(2)</sup>. 이들 중에 진공 회로차단기(vacuum circuit breaker: VCB)는 진공용기(vacuum interrupter: VI)내에서 아크 발생시 전자기력에 의해 아크를 소호시키는 것으로, 소형으로 고성능이며 보수 점검이 용이하고, 공해요소가 거의 없는 등의 많은 장점이 있어, 고압 회로차단기로서 널리 사용되고 있다. 이러한 VCB 구동메커니즘은 소형 차단기의 개폐 스위치와도 같은 역할을 하는 기구로서 스프링에 미리 충전된 탄성에너지

를 캠 및 링크를 이용한 기구부에서 운동에너지를 변환시켜 접점을 개폐하는 운동을 생성한다<sup>(3)</sup>.

VCB의 구동메커니즘에는 조인트들과 링크들로 구성된 기구학적 체인, 동작시 발생하는 부품들 사이의 충격, 회전조인트에서의 마찰 등과 같은 많은 동적 현상이 존재한다. 이러한 현상은 구동메커니즘의 동특성을 묘사하는 동적 모델의 수립 및 검증을 어렵게 만들고 있다. 과거에는 이에 대한 체계적 해석과 설계 방법보다는 간단한 이론과 함께 설계자의 경험 및 시행착오(trial and error)에 의해 보다 많이 설계되어 왔다<sup>(4,5)</sup>.

그러나 컴퓨터의 이용과 발전에 따라 VCB의 구동메커니즘과 같이 여러 개의 물체로 이루어진 시스템에 대한 다물체 동역학(multibody dynamics)의 연구와 병행하여 여러 상용프로그램들이 개발되었다. 70년대 이후로 개발된 대표적인 상용프로그램으로는 DADS, ADAMS 등이 있다<sup>(6,7)</sup>. 이러한 상용프로그램을 사용하여, 실제 VCB의 동특성을 모사(simulation)할 수 있는 동적모델에 대한 연구가 수행되어 졌다<sup>(8,9)</sup>.

그러나 본 논문에서는 이미 실험적으로 검증된 VCB 동적모델<sup>(9)</sup>을 기반으로 하여, 개선된 메커니

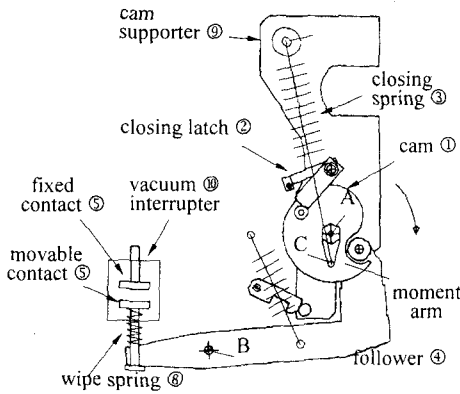
\* LG 산전 전력연구소

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

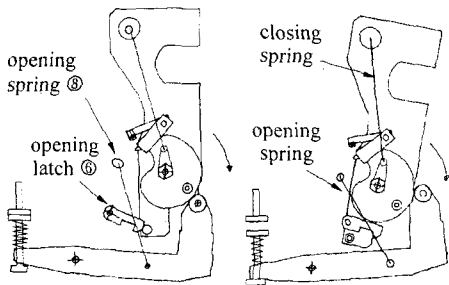
증 설계를 위한 설계 프로세서(design process)를 정립하여 기존보다 성능이 뛰어난 VCB 메커니즘의 개발에 적용하고자 한다. 먼저, 기존 메커니즘의 에너지 흐름(energy flow) 분석을 통하여, 기존보다 적은 스프링의 에너지를 사용하는 성능이 우수한 메커니즘의 개념 설계가 제안되고, 정립된 설계 프로세서를 사용하여 상세 설계되어 진다.

본 논문에서 다루어지는 VCB 의 차단용량은 31.5kA 이고, 구조는 Fig. 1 과 같으며, 접점의 투입(closing)과 차단(opening)동작은 Fig. 1(a), (b), (c)와 같이 순차적으로 진행된다.

- 1) 투입동작: 투입 래치(㉒)를 해제하면, 캠이 회전하기 시작하고 캠은 종동절(㉔)을 밀어 접점을 닫히게 하여, Fig. 1(b)의 투입 상태가 된다.
- 2) 차단동작: 차단 래치(㉖)를 해제하면 먼저 와이프(㉗)와 차단 스프링(㉘)에 의하여 종동절이 반시계방향으로 회전하여 캠과 캠지지대(㉙)를 시계방향으로 회전시키고, 그 다음 차단스프링의 힘만으로 종동절은 회전하고 가동접점은 아래로 움직여서 차단 상태가 된다(Fig. 1(c)).



(a) Initial state



(b) Closed state (b) Opened state

Fig. 1 Structure and operations of vacuum circuit breaker

## 2. 차단동작시의 에너지 흐름

VCB 메커니즘의 차단동작시의 에너지 흐름을 분석하는 것은 축적된 스프링들의 에너지가 어디로 전달되는지 분석하는데 큰 도움이 된다. 차단 동작에 대한 에너지 흐름을 분석할 때 스프링에 의한 포텐셜 에너지(potential energy)에 비하여 중력에 의한 포텐셜 에너지는 영향이 적으므로 고려하지 않았다.

차단동작을 식(1)과 같은 일과 에너지식(work-energy equation)으로 조사하면 에너지 흐름을 쉽게 분석할 수 있다.

$$W_{1 \rightarrow 2} = T_2 - T_1 = V_1 - V_2 + W_{1 \rightarrow 2}^{nc} \quad (1)$$

여기에서 아래첨자 1 은 임의의 위치를, 2 는 그 다음 위치를 나타낸다. 그리고  $W_{1 \rightarrow 2}^{nc}$  는 위치 1 과 2 사이에서 비보존력(nonconservative force)에 의한 일을 나타낸다. 운동에너지  $T$  는 가동접점의 병진 운동에너지, 캠과 캠지지대로 이루어진 부분과 종동절의 회전 운동에너지에 의해 표현되고, 포텐셜 에너지  $V$  는 와이프와 차단 스프링에 의한 포텐셜 에너지에 의해 표현된다. 식(1)을 이용하여 차단 동작 과정의 에너지 흐름을 분석하면 다음과 같다.

- 1) 차단래치의 해제에 의한 초기 운동으로부터 종동절과 가동접점의 하단부가 충돌하기 전:

$$V_1 - V_j + W_{1 \rightarrow j}^{nc} = T_j - T_1 \quad (2)$$

여기에서,  $W_{1 \rightarrow j}^{nc} = 0$ ,

$$V_j = \frac{1}{2} k_w (l_{wj} - l_{w0})^2 + \frac{1}{2} k_o (l_{oj} - l_{o0})^2,$$

$$T_1 = 0, \quad T_j = \frac{1}{2} I_p \dot{\alpha}_j^2 + \frac{1}{2} I_f \dot{\theta}_j^2$$

이 구간에서 가동접점은 움직이지 않으므로, 진공과 대기의 압력차이에 의해 발생하는 자력력에 의한 일은 영(zero)이 된다. 그리고 와이프와 차단 스프링이 함께 작용하므로 포텐셜 에너지에는 두 스프링에 의한 것이 포함된다.  $k_w$  와  $k_o$  는 와이프와 차단 스프링의 강성을 나타내고,  $l_{w0}$  와  $l_{o0}$  는 스프링들의 자유길이(free length)를 나타낸다. 초기에 메커니즘은 정지해 있으므로 초기의 운동에너지  $T_1$  는 영이 된다.  $I_p$  와  $I_f$  는 각각 캠과 캠지지대로 이루어진 부분과 종동절의 회전축에 대한 관성을 나타내고,  $\dot{\alpha}$  와  $\dot{\theta}$  는 각각 캠지지대와 종동절 회전축의 속도를 나타낸다.

- 2) 종동절과 가동접점의 하단부가 충돌할 때:

종동절과 가동접점 하단부의 충돌 직전에 캠과 캠지지대로 이루어진 부분이 종동절에서 분리되

어 등속회전 운동하므로 가동접점과 충돌하는 등가질량은 중동절 뿐이다. Fig. 2는 차단동작 시 캠과 캠지지대로 이루어진 부분과 중동절의 각속도를 나타낸다. 여기에서 중동절의 속도가 감소하는 부분이 중동절과 가동접점 하단부가 충돌하는 시점이고, 캠과 캠지지대로 이루어진 부분은 중동절에서 분리되어 등속회전 운동함을 알 수 있다. 따라서 중동절과 가동접점의 충돌시 다음과 같이 운동에너지를 잃게 된다.

$$\Delta T = \frac{1}{2} \left( \frac{M_f \times M_c}{M_f + M_c} \right) (1 - e^2) (v_{f0} - v_{c0})^2 \quad (3)$$

여기에서  $e$ 는 변환레버와 접점사이의 반발계수이며,  $M_f$ 는 충돌 전 중동절의 질량을 접점축 상으로 환산한 등가질량을,  $M_c$ 는 3상의 가동접점의 질량을 나타낸다.  $v_{f0}$ 는 중동절의 접점축 상의 충돌 전 속도이고,  $v_{c0}$ 는 가동접점의 충돌 전 속도이다. 가동접점은 충돌 전 움직이지 않으므로  $v_{c0}$ 는 영이 된다. 고속카메라의 관찰에 의하면 중동절과 가동접점부는 충돌 후 함께 운동하므로 반발계수는 0으로 가정되어진다.

### 3) 가동접점이 중동절과의 충돌 후:

이 구간에서 중동절과 가동접점의 속도를 계산하기 위해서는 가동접점과 중동절의 충돌 전에 캠과 캠지지대가 분리되면서 가지고 나가는 운동에너지와 충돌시 잃어버린 에너지를 빼주어야 한다. 그리고 가동접점이 움직이기 시작하면 가동접점에 작용하는 자폐력에 의한 일도 계산되어 진다.

$$V_1 - V_j - \frac{1}{2} I_p \dot{\alpha}_p^2 - \Delta T + W_{1 \rightarrow j}^{nc} = T_j - T_1 \quad (4)$$

여기에서,

$$W_{1 \rightarrow j}^{nc} = 3F \times S, \quad V_j = \frac{1}{2} k_o (l_{oj} - l_{o0})^2,$$

$$T_1 = 0, \quad T_j = \frac{1}{2} I_f \dot{\theta}_j^2 + \frac{1}{2} M_c v_j^2$$

$\dot{\alpha}_p$ 는 중동절과 가동접점 하단부의 충돌 전 캠과 캠지지대로 이루어진 부분의 회전속도를,  $F$ 는 자폐력을,  $S$ 는 가동접점의 변위를 나타낸다. 이 동작구간에서 와이프스프링은 에너지를 방출하지 않으므로 포텐셜 에너지는 차단스프링에 의한 에너지 뿐이다. 그리고 운동에너지는 중동절과 가동접점의 에너지만 포함된다.

위의 일과 에너지식을 이용하여 차단동작 시 31.5kA VCB의 에너지흐름은 Fig. 3와 같으며, 여기에서 가동접점 하단부가 중동절에 충돌할 때 잃는 손실에너지는 캠과 캠지지대로 이루어진 부분

이 중동절로부터 분리될 때 가져나가는 운동에너지보다 훨씬 적음을 알 수 있다. 초기의 전체에너지는 와이프와 차단스프링의 포텐셜에너지의 합으로써 153 Nm 이고, 캠기구부가 분리될 때 잃는 에너지는 38.6 Nm이며, 중동절과 가동접점이 충돌할 때 잃는 에너지는 2.95 Nm이다.

따라서 차단동작 시에 캠과 캠지지대로 이루어진 부분이 고정된다면 기존 VCB의 차단동작에서 캠과 캠지지대의 운동에너지가 불필요하게 되어 차단스프링의 크기를 작게 할 수 있다. 그리고 투입스프링에 의해 인장되는 차단스프링의 크기를 줄일 수 있으므로 투입스프링의 크기도 작게 할 수 있다. 이러한 에너지의 감소는 투입과 차단에 관련된 설계 인자들을 줄이게 한다. 이것은 메커니즘부의 크기(Size)를 감소시킬 뿐만 아니라 투입 및 차단동작 시에 발생하는 메커니즘 요소사이에 발생하는 충격력을 감소시킨다. 이것은 VCB 메커니즘을 전체적으로 더욱 안정화시킨다.

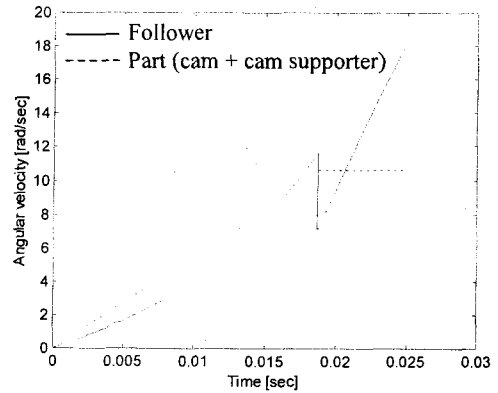


Fig. 2 Angular velocity of follower and part (cam+cam supporter)

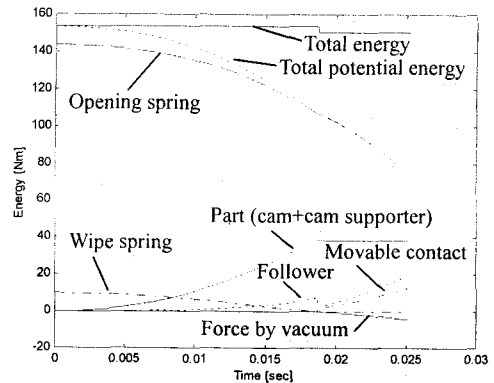


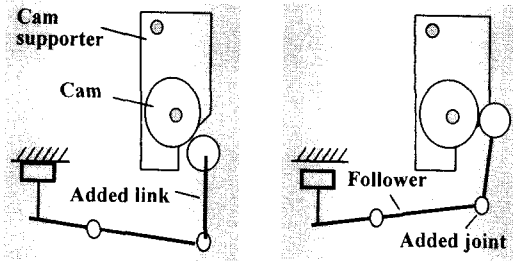
Fig. 3 Energy flow during opening operation (Original VCB)

### 3. 동적모델에 기반한 설계

본 절에서는 차단 동작시에 캠지지대가 고정된 상태에서 적은 스프링의 에너지로서 투입 및 차단 동작을 할 수 있는 새로운 VCB 메커니즘에 대한 개념 설계(concept design)를 제안하고, 이미 검증된 동적모델에 기반한 설계 프로세서에 의해 상세 설계를 하고자 한다.

#### 3.1 개념설계

기존 메커니즘의 구조를 많이 변경되지 않으면서, 캠지지대가 고정된 상태에서 차단되기 위해서는 중동절의 롤러가 캠 표면을 따라 위로 미끄러지는 경우를 고려할 수 있다. Fig. 4는 기존 메커니즘의 중동절과 롤러 사이에 새로운 링크와 회전 조인트를 추가하여 차단동작을 수행하는 새로운 VCB의 개념설계를 나타낸다.



(a) Closed state (b) Opened state  
Fig. 4 Concept design of new VCB mechanism

#### 3.2 동적모델에 기반한 설계 프로세서

앞에서 제안된 개념설계는 Fig. 5와 같이 기존의 VCB 메커니즘의 동특성 분석에 이용된 동적 모델에 기반한 설계 프로세서(design process)에 의해 상세설계 되어진다. 이러한 프로세서의 단계는 본 논문을 통하여 이 단계들에 대한 의미 및 적용 방법을 확립하여 다른 종류의 기계 메커니즘에 적용될 수 있도록 정립하였다. 정립된 설계 프로세서에 의한 메커니즘 개발은 개발기간을 단축시킬 뿐만 아니라 최적화된 메커니즘을 설계하도록 한다. Fig. 5의 프로세서 각각의 단계에서 수행되는 연구와 새로운 VCB 개발에 적용된 결과를 차례로 설명하면 다음과 같다.

- 1) **Concept Design:** 요구되는 기능을 만족하는 설계, 우수한 설계 안을 선택 ⇒ 새로운 VCB의 개념설계.
- 2) **Build Virtual System:** 개념설계 모델 구성, 개선된 개념설계, 상세설계 시작 ⇒ ADAMS를 이용한 개념설계에 대한 모델 구성.
- 3) **Perform Virtual Test:** 모델에 대한 운동분석과

메커니즘 요소간의 간섭체크 등을 통한 설계변경 ⇒ 개념설계에 대한 설계수정.

- 4) **Investigate Results:** 모델에 대한 동특성 분석 ⇒ 설계 변경된 개념설계에 대한 동특성 분석.
- 5) **Desired Performance:** 요구되는 성능과 비교 ⇒ 규정된 투입 및 차단속도와 비교.
- 6) **Change Design:** 성능과 요구사항이 만족되지 않으면 설계 변경 ⇒ 설계 수정.
- 7) **Yield Design Data:** 상세 설계된 설계치를 이용하여 형상 모델링 프로그램(Pro/Engineer)을 이용하여 설계 데이터 도출 ⇒ ADAMS에서 설계된 상세설계의 기하학적 정보를 Pro/Engineer에 넘겨 설계도면 도출.
- 8) **Build Physical System:** 설계 도면으로부터 실제 제품 제작 ⇒ 추가 및 변경되는 부품을 가공하여 새로운 VCB 제작.
- 9) **Experiment Physical System:** 실제 제품의 특성 분석, 설계치를 확인 및 검증 ⇒ 새로운 VCB에 대한 동특성 분석 및 설계 검증.

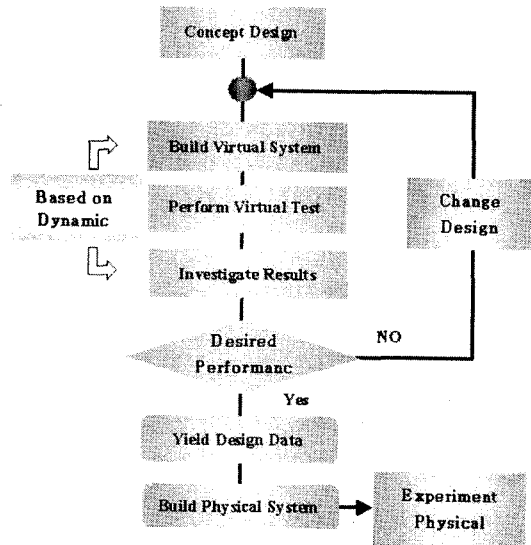


Fig. 5 Design procedure of mechanism based on VCB dynamic model

#### 3.3 상세설계

새로운 VCB의 개념설계는 Fig. 5의 설계 프로세서를 통하여 제품으로 적용할 수 있는 Fig. 6과 같은 상세설계가 얻어진다. Fig. 6은 기존 메커니즘에서 변경된 부분을 나타낸다. 그리고 핵심 부분으로서 추가된 롤러링크와 회전조인트를 제외한 부가적으로 필요한 부품은 다음과 같다.

- 링크복귀스프링(link return spring): 차단 후, 롤러링크를 차단기의 초기상태로 만들기 위해 반시계방향으로 회전시킨다.

- 차단래치 복귀스프링(opening latch return spring): 차단 후, 롤러링크가 초기상태로 될 때 차단래치를 회전시켜 항상 차단롤러와 접촉을 유지하도록 한다.
- 링크 스폰트(link supporter): 초기상태에서 캠과 롤러사이의 초기위치가 일정하도록 하며, 링크 복귀스프링에 의해 롤러링크가 반시계 방향으로 더 이상 회전하지 못하도록 한다.

Fig. 6 의 모델에서 결정된 기구학적 형상 정보를 3 차원 강체 모델링 프로그램인 Pro/Engineer 에 넘겨 추가 및 변경되는 부품의 3 차원 형상과 도면을 도출한다.

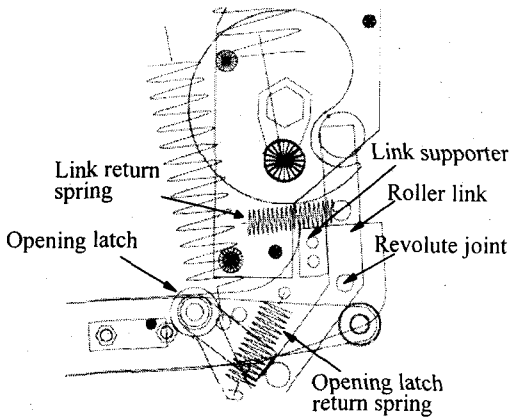


Fig. 6 Detailed design of new VCB

#### 4. 동특성 분석 및 실험

제안된 새로운 VCB 의 조립시 캠지대는 부가적인 부재로 고정하여 차단과 투입동작 시에 움직임이 없도록 하였다. 캠지대의 고정시 조립공차로 인하여 롤러의 위치가 상대적으로 기존 VCB 보다 캠쪽으로 이동되어, 캠과 롤러의 초기간격은 줄어들었다. 실제 조립된 VCB 의 특성분석을 위하여 고속카메라(high-speed camera)를 사용하여 가동접점과 종동절 등의 변위를 분석하였다. 그리고 실험에서 새로운 VCB 가 기존 VCB 보다 높은 차단속도를 가짐을 보이고, 서로 비교하기 위하여 같은 투입과 차단 스프링을 사용하였다.

Fig. 7 는 투입 동작시 종동절의 변위를 나타낸다. 여기에서 새로운 VCB 의 동특성 모델은 실제 제품의 투입특성을 잘 묘사하는 것을 알 수 있으며, 처음부분을 제외하면 31.5kA VCB 의 투입특성과 비슷함을 볼 수 있다. 그러나 초기에 기존 VCB 와 차이가 나는 것은 새로운 VCB 에서 캠과 롤러의 초기간격의 감소와 롤러링크의 추가로 종

동절에 대한 관성모멘트의 증가 때문이다.

Fig. 8 은 차단 동작시 종동절의 변위를 나타낸다. 여기에서 새로운 VCB 의 실험과 해석결과를 비교할 때 동특성 모델은 실제 제품의 차단특성을 잘 묘사하는 것을 볼 수 있다. 그리고 캠지대가 고정됨으로써 차단특성은 기존 VCB 에 비해 훨씬 좋아짐을 알 수 있다. Table. 1 에서 새로운 VCB 의 차단속도가 2 배 이상 향상됨을 알 수 있다.

진공 회로차단기의 가동접점의 규정된 기계적인 차단속도는 1.0 m/sec 로, 새로운 VCB 의 높은 차단속도를 규정 값에 만족하도록 하기 위해서는 차단에 관련된 설계인자를 줄여야 한다. 또한 차단 에너지의 감소는 투입에너지의 감소를 유발시켜 투입에 관련된 설계인자도 줄일 수 있게 한다. 이것은 VCB 메커니즘을 전체적으로 안정화 시킨다.

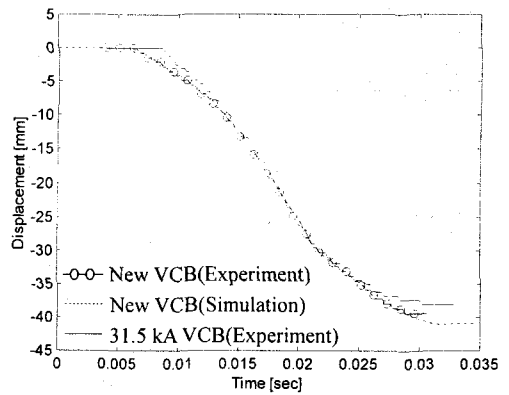


Fig. 7 Displacement of follower during closing

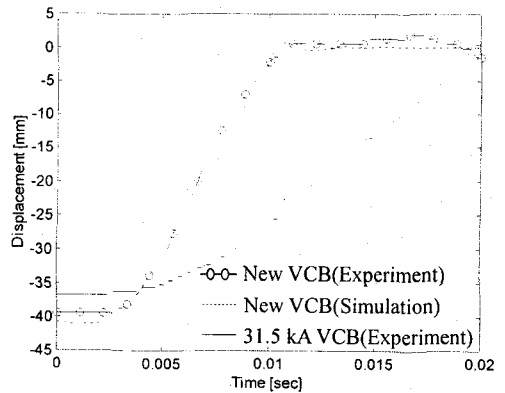


Fig. 8 Displacement of follower during opening operation

Fig. 9 는 동적모델에 의한 새로운 VCB 의 차단 동작을 보여준다. 먼저 차단래치가 차단링크에 의해 해제되면 롤러링크의 추가된 회전조인트로 인

하여 캠과 롤러사이의 자유로운 접촉상태가 된다. 즉 롤러링크는 차단동작 시 캠에 힘을 전달하지 않는다. 그리고 와이프와 차단 스프링들의 힘에 의해 중동절은 반시계 방향으로 회전하고 중동절에 회전조인트로 결합된 롤러링크는 캠면을 따라 상승하면서 차단동작이 완료된다.

차단동작 시 새로운 VCB 의 에너지의 에너지흐름은 Fig. 10 와 같으며, Fig. 3 과 비교할 때 스프링에 의한 포텐셜 에너지가 캠지대의 운동에너지로 전달되지 않기 때문에 중동절과 가동접점의 운동에너지에 전달되는 양이 아주 큼을 알 수 있다. 이러한 증가된 운동에너지는 접점의 차단속도를 증가시킨다.

## 5. 결론

VCB 메커니즘의 차단동작 시의 에너지 흐름을 분석하여, 차단특성을 방해하는 캠지대에 의한 회전운동에너지는 전체 차단에너지의 25%정도로서 아주 큼을 보였다. 만일 차단시 캠지대가 회전되지 않는다면 메커니즘의 성능은 아주 뛰어난을 예시하였다. 그리고 기존 제품에 대하여 개발된 동적모델을 기반으로 뛰어난 성능을 가진 구동 메커니즘의 설계방법을 제시하였고, 이 방법으로 차단시에 캠지대가 고정된, 새로운 메커니즘을 설계하여 기존의 진공 회로차단기보다 차단속도가 2 배 이상 뛰어난을 보였다.

Table. 1 Comparison of opening velocity between original and new VCB

Opening velocity (m/sec)	Experiment	Simulation
Original VCB	0.98	1.00
New VCB	1.96	2.05

## 참고문헌

- (1) Willis, H. L., 1997, *Power Distribution Planning Reference Book*, Marcel Dekker, Inc.
- (2) Flurschein, C. H., 1975, *Power Circuit Breaker Theory and Design*, Short Run Press Ltd.
- (3) Greenwood, A., 1994, *Vacuum Switchgear*, Short Run Press Ltd.
- (4) Van Sickle, R. C. and Goodman, T. P., 1953, "Spring Actuated Linkage Analysis to Increase Speed," *Product Engineering*, Vol. 24, pp. 152-157, July.
- (5) Bush, R. R. and Carter, G. K., 1953, "The Application of Analytical Methods in Power Circuit Breaker Mechanism Design," *AIEE Pacific General Meeting*, Vancouver, B. C. Canada, Sept. 1-4.
- (6) DADS(Dynamic Analysis and Design System) Reference Manual., Computer Aided Design Software Incorporated, Iowa, U.S.A.
- (7) ADAMS(Automated Dynamic Analysis of Mechanical System) Reference Manual., Mechanical Dynamics Incorporated, U.S.A.
- (8) Root, R. R., 1983, "The Circuit Breaker-A Practical Example in Engineering Optimization," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 18, No. 3, pp. 229-235.
- (9) Ahn, K. Y., Kang, K.R., Lee, C. S., Choe, J. W., Kim, S. H. and Kawk, Y. K., 1997, "Modeling and Analysis for a High Speed Cam-Follower Mechanism of Power Circuit Breaker", *Asia-Pacific Vib. Conf. '97*, Korea.

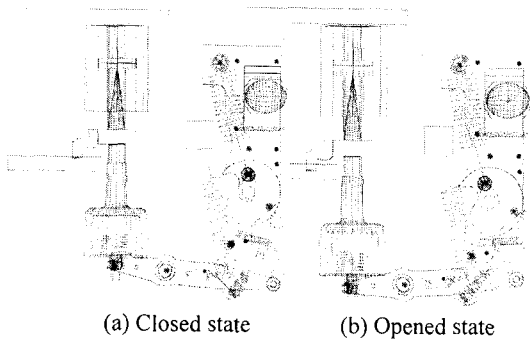


Fig. 9 Opening operation of Fixed VCB

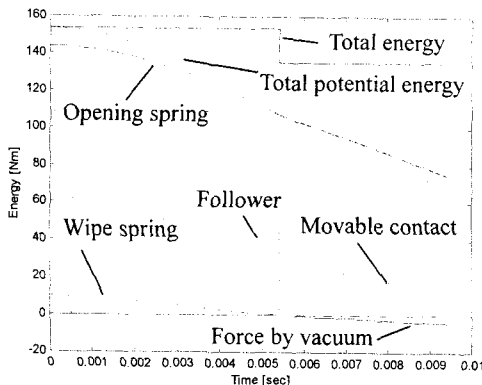


Fig. 10 Energy flow during opening operation (New VCB)