

전자기력의 영향을 포함한 MCCB 기구부의 동역학적 모델링 방법 연구

강 경 록* · 유 흥 희†

(2000년 1월 7일 접수, 2000년 12월 20일 심사완료)

Study on the Dynamic Modeling of a MCCB Mechanism Including Electro-magnetic Force Effect

Kyeong Rok Kang and Hong Hee Yoo

Key Words : MCCB(배선용 차단기), Limiting MCCB(한류형 배선용 차단기), Limiting Characteristics(한류특성), Limited Current(한류전류), Electro-Magnetic Force(전자기력), Dynamic Modeling(동적모델링), Dynamic Analysis(동적해석)

Abstract

To design a limiting MCCB (Molded Case Circuit Breaker) mechanism, a dynamic modeling of the mechanism in which the electro-magnetic force effects are incorporated needs to be developed. Conventionally, electro-magnetic effects were considered separately for the design of the mechanism. In this paper, an electro-magnetic force that is induced by limited current is identified and included in the dynamic modeling of the mechanism. Thus, the electro-magnetic which is defined as a external force and the mechanical effects are simultaneously considered for the design of the mechanism which is composed of contactor, spring, link, latch and so on.

1. 서론

배전 시스템에서 사용되는 전력기기 중 배선용 차단기는 보통 MCCB(Molded Case Circuit Breaker)라 불리우며, 교류 600V, 직류 500V 이하의 전로를 과전류사고나 단락사고로부터 보호하기 위하여 사용되는 기기이다. KS 규격에서는 "개폐기구, 트립 장치 등을 절연물의 용기 내에 일체로 조립한 것이며, 통상 사용시 전로를 수동으로 혹은 절연물 용기 외부의 전기 조작장치 등에 의하여 개폐할 수 있고, 과부하 및 단락 등의 경우, 자동적으로 전로를 차단하는 기구"로 정의하고 있다.^(1,2) 현재 MCCB 설계를 위해서는 한류 특성에 의한

전자반발력이나 트립부 아마추어 흡인력 등의 계산을 독립적으로 수행하여 전자기적인 특성을 설계에 반영하며 이에 근거하여 가동접촉자 리미트 스프링(Limit Spring), 아마추어등 주요부품의 기계적인 요소를 설계하였다.⁽³⁾ 그러나 설계시 전기적인 영향과 기계적인 영향을 동시에 검토할 수 있는 해석모델이 없어 실제 설계변수들 간의 상관관계를 파악하고 설계하는 데에는 이 방법은 한계가 있어 전기적인 영향과 기계적인 영향을 동시에 고려할 수 있는 동적 해석모델의 개발이 절실히 요구되어지고 있다.

본 연구에서는 현재 국내에서 차세대 제품으로 개발이 진행되고 있는 특정 MCCB 모델을 대상으로 단락전류에 의한 한류 특성과 개폐기구부의 기계적 특성으로 전류가 차단되는 일련의 거동을 해석하고자 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 MCCB 거동에 영향을 주는 전자기적 힘들을 모델링하고 이를 기구 동역학 해석과 연계하는 연구결과를 제시하려 한다. 본 연구에서 다루는 각 부품들의 기하학적 형상과 특성값 3 차원 CAD 프로그

* OTS Technology 주식회사

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

Email : hhyoo@email.hanyang.ac.kr

TEL : (02)2290-0446 FAX : (02) 2293-5070

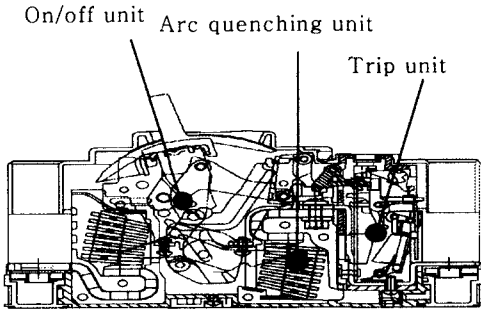


Fig. 1 Schematic diagram of MCCB

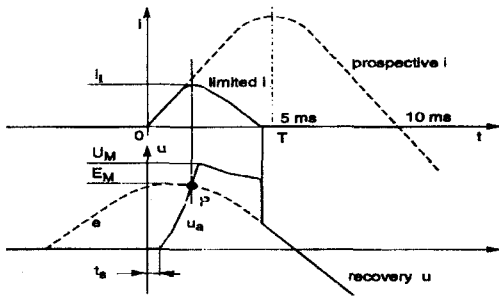


Fig. 2 Current and voltage change due to limiting characteristics

램인 Pro Engineer⁽⁴⁾를 이용하여 구했다. 이와 아울러 기구 동역학 해석은 상용 동역학 해석프로그램인 ADAMS⁽⁵⁾를 이용하였으며 동적 해석시 사용될 전자기력의 계산은 전용 해석프로그램인 MAXWELL⁽⁶⁾을 이용하였다.

2. 한류형 MCCB의 구성 및 특성

2.1 구성

MCCB는 기능상으로 분류하여 개폐기구부(한류장치), 트립부 그리고 소호부의 세 요소로 구성된다. 개폐기구부는 차단동작이 최종적으로 발생하는 곳이며 트립부는 개폐기구부의 동작을 격발시키는 요소이고 소호부는 단락전류에 의해 가동접촉자가 떨어질 때에 발생하는 아크를 흡인시켜 소호시키는 요소이다(Fig. 1 참조).

2.2 한류 특성(Limiting characteristics)

단락사고시, MCCB를 통해서 흐르게 되는 점선으로 표현된 예상 단락전류(Prospective short-circuit current)보다 실선으로 표현된 훨씬 낮은 크기의 전류(Limited current)로 제한하는 특성을 한류 특성 이후에 U_a 와 같은 전압파형이 나타나는 모습을

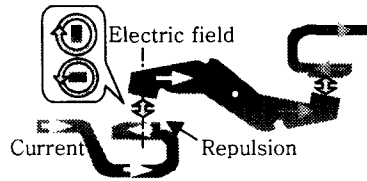


Fig. 3 Repulsion force between contactors

보여준다(Fig. 2 참조). 따라서 이 특성에 의해 최대 통과전류가 작게 억제되면, 단락전류로부터 발생되는 열이 감소되므로 기계적 손상을 방지할 수 있다.

2.3 차단 과정

단락사고 발생시 MCCB가 동작하는 과정을 살펴보면 배전계통을 통해 유입되는 단락전류는 전류 경로에서 가장 가깝게 위치한 고정 접촉자와 가동접촉자의 사이를 흐르면서 두 접촉자 사이에 전자반발력(Repulsion force)을 발생시킨다(Fig. 3 참조). 그런데 이 전자반발력이 가동접촉자의 가압력보다 크게 되면 그 시점부터 접촉자가 분리되면서 아크가 발생된다. 한편 이 아크를 통해 형성된 전류경로를 통해 일정시간(아크가 소멸되어 회복 전압이 생기는 시간)동안 제한된 단락전류가 트립부에 흘러, 트립부의 아마추어를 회전시키는 흡인력을 발생시킨다. 한편 이 힘은 궁극적으로 개폐기구부의 작동을 링크장치를 통해 유발한다. 즉 주스프링에 축적된 에너지가 방출되면서 개폐기구부의 주요 링크장치를 통해 기구적으로 가동접촉자를 고정 접촉자로부터 완전히 분리시키는 기계적 과정을 수행한다(Fig. 1 참조). 이 때 아크는 접점에서 발생, 아크런너(Arc Runner)위를 빠르게 이동하여 소호실 안으로 들어가며 접점간의 거리가 증가함에 따라 아크의 길이는 증가한다. 또 아크는 소호실 내의 V자형 구조를 갖는 자성 금속판과 아크 전류와의 사이에서 발생하는 전자기력에 의해서 그리드 안으로 흡인된다(Fig. 4 참조). 이때 아크전압이 전원전압을 상회하게 되면 아크전압을 유지하기 어려워지므로 아크는 소멸하고 접점간에 전원 전압에 상당하는 회복전압(Fig. 2 참조)이 나타나며 이 상태에서 전류의 차단이 완료된다.⁽⁷⁾

3. 전자기 해석을 위한 유한요소 모델링

3.1 전자반발력 해석 모델링

효율적인 유한요소해석을 위해 고정 접촉자와

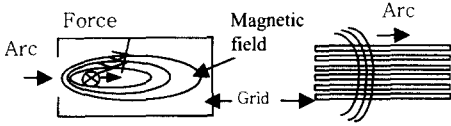


Fig. 4 Between of arc in arc quenching unit

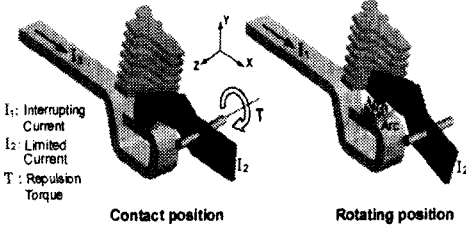


Fig. 5 Analysis model of moving contactor

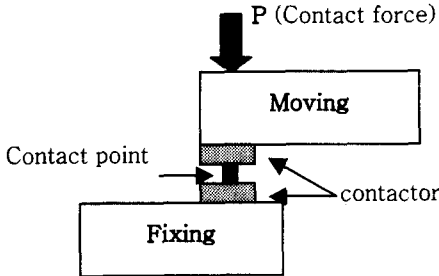


Fig. 6 Contact point between contactors

가동 접촉자를 XY 평면을 기준으로(Fig. 5 를 참조), 가동 접촉자를 회전 중심에 대하여서 YZ 평면을 기준으로 대칭하게 나누고 1/4 로 모델링 하였다. 그리고 가동접촉자가 고정접촉자와 붙어있는 상태 (0 deg)에 대해 모델링 하였고, 회전하는 상태에 대해서는 각도별(3, 6, 9, 12, 15, 20, 25, 30deg)로 각각 모델링 하였다. 우선 붙어있는 상태를 모델링 하기 위해서 접촉점의 반경 r 은 다음식에 의해 구할 수 있다.⁽⁸⁻¹⁰⁾(Fig. 6 참조)

$$r = \sqrt{P / \pi \xi H} \quad (1)$$

여기서 P 는 접촉력(N), ξ 는 점접 접촉면의 상태에 따라 결정되는 상수(보통 0.5~0.7), H 는 점접재료의 브린넬경도이다. 또한 회전하는 상태에 대한 모델링은 모두 직경 8mm 의 아크기둥이 형성되는 것으로 가정하며 이때 가동접촉자에 작용하는 전자반발력 F 와 전자반발토크 T 는 다음식에 의해 구할 수 있다.^(11, 12)

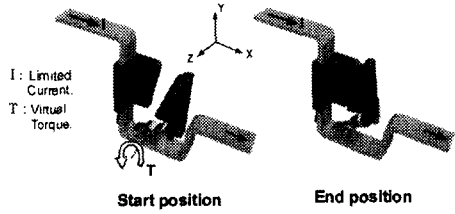


Fig. 7 Analysis model of armature

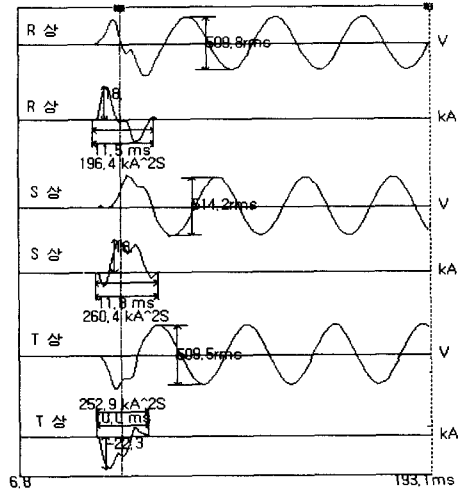


Fig. 8 Interrupting test results

$$F = \int [(J_o + J_e) \times B] dv = \int f dv \quad (2)$$

$$T = \int [r \times (J_o + J_e) \times B] dv = \int (r \times f) dv \quad (3)$$

여기서 v 는 아크기둥의 영역, J_o 는 입력전류밀도 (A/m^2), J_e 는 유도전류밀도(A/m^2), B 는 자속밀도 ($Weber/m^2$), f 는 전자력밀도(N/m^2), r 은 회전축으로부터 측정된 변위벡터이며 J_e 항은 MCCB 의 구조상 유도전류가 발생될 경로가 없기 때문에 식 (2, 3)에서 무시할 수 있다.

3.2 흡인력 해석 모델링

효율적인 유한요소해석을 위해 아마추어와 도체를 XY 평면을 기준으로 대칭하게 나누어 1/2 로 모델링하고 아마추어의 최대 회전각도를 기준 각도별(0, 3.5, 6.5, 10, 13.5deg)로 각각 모델링 하였다. 유한요소해석시 트립부의 아마추어에 작용하는 흡인토크 T (Virtual Torque)는 다음의 식에 의해 구할 수 있다.

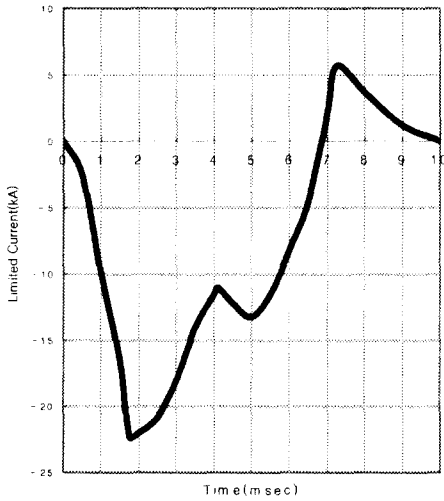


Fig. 9 Limited current (T phase)

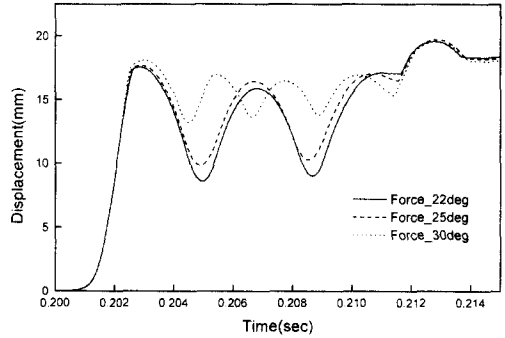


Fig. 11 Dynamic analysis results of moving contactor

4. 동적해석을 위한 모델링 및 해석결과

4.1 전자기력을 각도의 함수로 모델링하는 방법

4.1.1 개요 및 방법

가동접촉자에 미치는 전자반발력과 아마추어에 발생하는 흡인력을 MAXWELL 에서 계산하기 위해서는 단락시험을 통하여 얻어진 결과 중에서 제품특성을 가장 잘 표현하고 있는 단락시험 결과파형(Fig. 8 참조)을 이용하여 해석하게 된다. 특히 T 상을 확대한 한류전류파형(Fig. 9 참조)을 가지고 1 단계에서 개략적으로 가동접촉자의 각도에 대한 시간을 가정하고 여기서 가정한 값을 한류전류파형과 비교하여 각도에 대한 한류 전류값을 구한다. 2 단계에서는 1 단계에서 구한 한류 전류값들을 유한요소모델에 입력 전류값으로 적용하여 회전각도별로 가동접촉자의 전자반발력 및 아마추어의 흡인력을 구한다. 3 단계에서는 동역학 해석시, 보간법을 이용하여 각도에 따른 힘을 정의한다. 4 단계에서는 실질적으로 전자반발력이 생기는 영역, 다시 말하면 외력이 작용하는 가동접촉자의 회전각도 영역을 결정하기 위해 조건문(특정 각도까지만 전자반발력이 작용하고 특정각도 이후는 전자반발력이 작용되지 않도록 Force 를 정의 함)을 가지고 전자반발력이 생기는 영역을 정의한다. 5 단계에서는 동역학 해석을 통해 가동접촉자와 아마추어의 시간에 대한 각도를 계산한다. 6 단계에서는 1 단계에서 가정한 값과 5 단계에서 해석된 값을 각도와 시간, 시간과 입력전류값의 관계를 이용하여 비교하고 다른 경우에는 1 단계로 가서 각도별 한류전류값을 다시 가정하여 위 과정을 다시 반복한다.

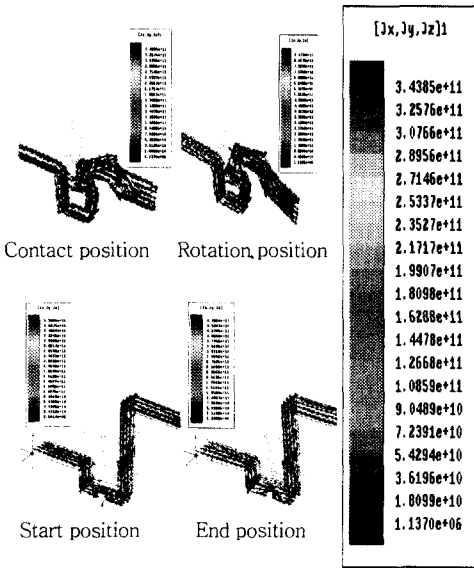


Fig. 10 Magnetic flux density distribution of contactor and armature

$$T = dW(\theta, i) / d\theta \Big|_{i=c} = \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{1}{2} \int_v \left(\int_0^H B \cdot dH \right) dv \right] \quad (4)$$

여기서 $W(\theta, i)$ 는 시스템의 자기 등가에너지 (Magnetic co-energy), θ 는 각변위, B 는 자속밀도 (Weber/m²), H 는 자속의 세기(A/m)이다.^(13,14)

4.1.2 해석 및 결과

Fig. 9의 한류전류파형을 입력값으로 하여 유한요소해석을 수행하면, Fig. 10과 같은 자속밀도와 Table 1, 2를 구할 수 있다. 그런데 이 힘들을 스프라인 보간법을 이용하여 각도에 대한 힘의 함수를 만들어 해석을 수행하면 종종 가동접촉자와 아마추어가 전혀 움직이지 않는 현상에 직면할 수 있다. 그 이유는 초기위치에서의 힘이 가동접촉자와 아마추어의 스프링 초기장력과 같아 중립 상태가 되기 때문인데 이 모델링 방법에서는 이러한 문제를 없애기 위해서 임의의 초기위치의 토크 값을 초기장력보다 크게 하여 스프라인 데이터에 적용하고 조건문을 이용하여 가동접촉자에 외력이 작용하는 각도의 영역을 22도, 25도, 30도로 각각 변화시키며 해석한다.

Fig. 11은 이 모델링을 통해 얻어진 결과로 가동접촉자가 조건문에서 설정된 각도 위에서는 자유운동을 하고 설정된 각도에 도달하면 다시 반발력이 작용하여 상승하는 운동을 반복적으로 보여주고 있다

4.1.3 문제점

가동접촉자가 떨어진 상태의 유한요소모델에 대해 각 회전각도에 대하여 일괄적으로 아크 반경을 직경 8mm, 아크 경로를 수직으로 한 것은 실제 아크 현상을 정확히 반영하지 못하고 있다. 또한 초기위치에서 설정된 토크 값들이 토션 스프링의 초

기장력과 같게 설정되어 있어 중립상태를 유지하므로 각도 변화가 전혀 생기지 않는 해석의 모순도 발생하고 있다. 따라서 각도 변화에 따라 외력을 투입하여 해석하는 모델링 방법은 이상의 문제를 해결하지 않으면 적절하지 않음을 알 수 있는데 아크 반경이나 경로를 회전각도에 대해 알아내는 것은 현실적으로 불가능한 문제이므로 결과적으로 이 모델링 방법은 해석의 정확성에 한계를 지닌다 하겠다.

4.2 전자기력을 시간의 함수로 모델링하는 방법

4.2.1 개요

한류 전류파형은 고정접촉자로부터 가동접촉자가 분리되면서 발생하는 아크 경로를 통해 전류가 통과되는 양을 나타낸다. 다시 말하면 이것은 시간과 긴밀한 연관관계를 가지고 있는 아크의 발생, 신장 및 소멸의 과정을 거치면서 나타나는 결과값이다. 또한 한류전류값에 의해 전자반발력과 흡인력이라는 기계적인 힘으로 변환되어 가동접촉자와 아마추어의 동작에 영향을 미친다. 따라서 시간에 따라 변화되는 한류전류파형을 이용하여 전자기력을 모델링하는 방법이 실제 현상을 잘 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2.2 전자반발력 및 흡인력의 계산

1) 전자반발력 계산

가동접촉자가 붙어있는 상태와 회전하는 상태로 나누어 모델링하고 계산한다. 우선 붙어있는 상태에 대해서는 3.1항의 "Contact position" 모델을 이용, 유한요소해석을 수행하면 가동접촉자의 접촉압력을 유지하기 위해 장착된 토션 스프링의 초기장력을 넘어서서 운동을 시작하는 전류값은 4.1kA임을 알 수 있다. 또한 가동접촉자가 회전하는 상태에 대해 3.1항에서 제시한 모델링 방법은 시간에 따라 변화하는 아크현상을 적절히 모델에 반영하고 있지 못하므로 한류전류파형을 이용하여 손쉽게 전자반발력 계산이 가능하도록 다음 식을 가정해 전자반발토크(T_{rot})를 계산한다.

$$T_{rot} = C \left(\frac{I_{rot}}{I_{con}} \right)^2 T_{con} \tag{5}$$

여기서 C 는 아크영향 비례상수이고 I_{rot} 는 구하고자 하는 시점의 전류값, I_{con} 는 접촉 시점의 전류값, T_{con} 는 접촉 시점의 전자반발토크이다.

Table 1 Repulsion torque of moving contactor

| Angle (Degree) | Limited Current (kA) | Torque (N.mm) |
|----------------|----------------------|---------------|
| 0 | 4.1 | 551 |
| -3 | 22.3 | 5309 |
| -6 | 22.0 | 4485 |
| -9 | 21.5 | 4442 |
| -12 | 21.0 | 4343 |
| -15 | 20.5 | 4509 |
| -20 | 19.5 | 4135 |
| -25 | 18.0 | 3893 |
| -30 | 16.5 | 3348 |

Table 2 Virtual torque armature

| Angle (Degree) | Limited Current (kA) | Torque (N.mm) |
|----------------|----------------------|---------------|
| 0 | 0.67 | 1.36 |
| 3.5 | 21.5 | 260 |
| 6.5 | 21.0 | 608 |
| 10 | 18.0 | 1308 |
| 13.5 | 15.5 | 3630 |

Table 3 Repulsion torque of moving contactor

| Time (msec) | Limited Current (kA) | Torque (N.mm) (C=1) | Torque (N.mm) (C=0.9) | Torque (N.mm) (C=0.8) | Torque (N.mm) (C=0.7) | Torque (N.mm) (C=0.6) | Torque (N.mm) (C=0.5) |
|-------------|----------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0.00 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.50 | -2.5 | 336 | 336 | 336 | 336 | 336 | 336 |
| 0.70 | -4.1 | 551 | 551 | 551 | 551 | 551 | 551 |
| 1.00 | -10.0 | 1344 | 1210 | 1075 | 941 | 806 | 672 |
| 1.75 | -22.3 | 2996 | 2696 | 2397 | 2097 | 1798 | 1498 |
| 2.50 | -20.8 | 2795 | 2515 | 2236 | 1957 | 1677 | 1398 |
| 3.50 | -14.0 | 1881 | 1693 | 1505 | 1317 | 1289 | 941 |
| 4.10 | -11.0 | 1478 | 1330 | 1182 | 1035 | 887 | 739 |
| 5.00 | -13.2 | 1774 | 1597 | 1419 | 1242 | 1064 | 887 |
| 6.00 | -8.2 | 1102 | 992 | 881 | 771 | 661 | 551 |
| 7.00 | 2.0 | 269 | 242 | 215 | 188 | 161 | 135 |
| 7.25 | 5.7 | 974 | 877 | 779 | 682 | 584 | 487 |
| 9.00 | 1.2 | 161 | 145 | 129 | 113 | 97 | 81 |
| 10.00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

식 (5)를 이용하여 한류전류파형(Fig. 9 참조)의 각시점에 대한 전자반발 토크를 Table 3 과 같이 구할 수 있다.

2) 흡인력 계산

아마추어의 초기위치에 대하여 유한요소해석을 수행하여 보면 본 논문에서 사용하는 모델의 토션 스프링 초기장력 1.38N.mm 에 해당하는 전류값 0.67kA 를 구할 수 있으며 아마추어의 동작은 발생하는 아크 현상과는 무관하므로 3.2 항에서 제시한 모델링 방법을 이용할 수 있는데 이 방법에서 문제점으로 지적된 초기위치에서 움직이지 않는 현상을 개선하기 위해 각 각도(0, 3.5, 6.5, 10, 13.5 deg)에 대한 흡인토크를 시간에 대한 흡인토크의 형태로 변환해 Table 4 와 같이 구할 수 있다.

4.2.3 해석방법 및 결과

유한요소해석을 통하여 단락사고시, 가동접촉자가 개리되는 전류값과 아마추어가 최초로 움직이는 전류값을 알 수 있다. 이 값들을 이용하여 순시 트립 동작에 대한 전류 반응영역을 검토하거나 스프링값, 가동접촉자 및 아마추어 형상 등에 대한 설계 개선안을 제시할 수 있다. 4.2.2 항을 통해 Table 3, 4 의 결과값들을 스플라인보간법을 이용하여 직접적으로 시간에 따른 외부 작용력의 함수 형태로 동역학 해석프로그램에 적용할 수 있다. 이 값에 가동접촉자의 전자반발력에 영향을 주는 아크영향 비례상수 C 값을 Table 3 에서와 같이 변화시켜서 동적 해석을 수행하면 시간에 따른 가동접촉자의 변위를(Fig 12 참조) 얻을 수 있다. 이 결과들 중에서 실제 거동과 가장 유사한 경우는

$C=0.6\sim 0.8$ 임을 알 수 있는데 그 이유는 다음과 같다. 가동접촉자가 리미트 핀에 부딪칠 때의 시간은 3.6~4.2 msec, 변위는 약 15mm 부근, 회전각은 약 32 도 이고 이때 한류전류 값은 약 11~13kA 로 피크치 22.3kA 의 약 1/2 배 정도의 힘이 작용하고 있음을 보여준다. 이것은 고정접촉자로부터 가동접촉자의 거리가 멀어질수록 즉 회전각도가 커질수록 한류전류값에 의해 발생하는 전자반발력이 감소되는 원리를 잘 표현하고 있다. 또한 가동접촉자가 리미트 핀에 부딪친 후 래치 해제 직전까지는 감소되는 전류값에 의해 반발력이 감소되어 가강하게 된다. 그러나 트립부의 동작에 의해 래치가 해제되는 시점부터는 가동접촉자가 전자반발력에 의해 압축된 토션 스프링의 에너지와 개폐기구부의 메인 스프링 에너지가 상쇄되는 시간 동안은 완만히 진행하다가 에너지가 완전히 소멸되는 시점부터 급격히 상승하는 것을 잘 보여주고 있다. 한편 트립력을 각 시점에서 증대시켰을 때의 거동을 구해 보면 앞에서 설명한 내용처럼 트립력과 밀접한 관계를 가지고 있는 래치의 해제시점이 빠를수록 다시 말하면 트립력이 클수록 급격히 상승하는 시점이 빨라지는 것을 잘 보여주고 있다. 결과적으로 앞에서 설명한 내용처럼 이 기구의 경우 $C=0.6\sim 0.8$ 일 때 가동접촉자의 거동이 실제 거동과 가장 유사하다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 한류형 MCCB 의 기구 동역학적 해석모델에 전자기력의 영향을 접목시키는 모델링 방법을 제시하였다. 그 방법으로 전자기력을 각도

의 함수로 모델링 하는 방법과 시간의 함수로 모델링 하는 방법을 제시하였으며 두 방법에 의한 해석결과의 분석을 통해 전자기력을 시간 함수로 모델링 하는 방법이 더 적절한 방법임을 확인 하였다. 또한 본 논문에서 개발된 모델링 방법에 의하여 동적해석을 수행하여 다양한 수치해석 결과를 제시하였으며 이러한 수치해석 결과들은 경험적으로 알려진 가동접촉자의 거동과 일치하는 것을 비교 함으로서 그 신뢰성을 확인하였다. 해석 과정에서 단락사고시 가동접촉자가 개리 되는 전류값은 4.1kA 이고 아마추어가 최초로 움직이는 전류 값은 0.67kA 임을 알 수 있었다. 이 값들은 실제현상과 일치함을 알 수 있었고 이 값들을 이용하여 세부적인 설계 개선안의 제시가 가능하게 되었다. 본 논문에서 제시하는 모델링 방법은 전기, 기계 설계변수 간의 특성 및 연관관계가 규명 될 수 있는 근간을 제공하고 있다. 이에 따라 가동접촉자, 아마추어, 링크류, 스프링류 등 주요 구성부품 및 조인트 위치와 관련한 설계방향 및 개선안 도출이 가능하게 되었다. 따라서 향후, 한류형 MCCB 의 고차단 용량화는 물론 유사 제품 개발에 있어서도 본 연구에서 개발된 모델링 방법을 유용하게 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) 한국표준협회, 1993, 공업진흥청 KSC 8321.
- (2) 송희찬, 1996, 배선용 차단기의 소호실 설계를 위한 아크의 자기 구동력의 3 차원 해석, 충북대 석사논문.
- (3) 한양대학교, 1999, MCCB Mechanism 의 기구 동역학적 설계체계확립을 위한 모델링 및 해석, 연구보고서.

- (4) PTC, 1997, Pro Engineer Reference Manual.
- (5) MDI, 1998, ADAMS/Solver Reference Manual.
- (6) ANSOFT, 1993, Maxwell 3D Field Simulator - 3D Magnetostatic Problem.
- (7) LG 산전, 1994, 배선용 차단기 기술자료집, pp. 2~35.
- (8) R.Holm , 1967, Electric Contacts, 4th ED.,Springer-Verlag.
- (9) K.Krause and J.Mental, 1975, "Magnetic Force Acting on Current-Carrying Contact Before and After Contact Separation, " Siemens Forsch. U. Entwickl. Ber. Bd.4, pp. 33~38.
- (10) Y. Kawasw, H. Mori, and S. Ito, 1997, "3-D Finite Element Analysis of Electrodynamical Repulsion Forces in Stationary Contacts Taking into Account Asymmetric Shape(Invited)," *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol.33, No. 2, pp. 1944~1999.
- (11) S. Ito, Y. Kawase and H. Mori , 1996 , "3-D Finite Element Analysis of Repulsion Forces on Contact Systems in Low Voltage Circuit Breaker," *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol.32, No. 3, pp. 1677~1680.
- (12) S. Ito, Y. Takato, Y. Kawase and T. Ota , 1998, "Numerical Analysis of Electromagnetic Forces in Low Voltage AC Circuit Breakers Using 3-D Finite Element Method Taking into Account Eddy Currents," *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol.34, No. 5, pp. 2597~2600.
- (13) J.L Cloulomb,1983, "A Methodology for the Determination of Global Electro mechanical Quantities from a Finite Element Analysis and Its Application to the Evaluation of Magnetic Forces, Torque and Stiffness," *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 19, No. 6, pp. 2514~2519.
- (14) J.L Cloulomb,1984, "Finite Element Implementation of Virtual Work Principle for Magnetic or Electric Force and Torque Computation," *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 20, No. 5, pp. 1894~1896.