

가스절연 개폐장치 투입저항의 동특성 해석

조해용#, 이성호*, 임성삼*, 이기정*, 김민우**

Dynamic Characteristics Analysis of Closing Resistors of Gas Insulated Switchgear

Hae-Yong Cho[#], Sung-Ho Lee^{*}, Sung-Sam Lim^{*}, Ki-Joung Lee^{*} and Min-Woo Kim^{**}

ABSTRACT

GIS(Gas Insulated Switchgear) is used in electric power system, to insure non conductivity, breaking capacity and operating reliability. The commercial dynamic analysis code COSMOS MOTION and 3-D modeling program SOLID WORKS were used to simulate dynamic analysis of the closing resistors of the GIS in this paper. To reduce chatter vibration of closing resistors, the motion of moving and fixed parts of closing resistors were simulated by varying the spring constant, the damping coefficient and the mass of moving and fixed parts. The simulated results were compared with experimental results. As a result, chatter vibration of closing resistors of the GIS could be reduced by using the results. These data can be used to determine the spring constant, the damping coefficient and mass of a moving part to reduce chatter vibration when the next model is developed.

Key Words : Gas Insulated Switchgear(가스절연 개폐장치), Dynamic Analysis(동특성 해석), Chatter Vibration(채터 진동), Closing resistors(투입 저항)

1. 서론

전력기기를 금속 탱크로 밀폐시킨 후 SF₆가스를 절연매질로 주입한 가스절연 개폐장치(GIS, Gas Insulated Switchgear)는 차단기, 단로기, 접지개폐기, 변류기 등으로 세분화 되며, 절연 성능과 차단 성능이 우수하고 운전신뢰성이 높아 전력계통에 많이 사용된다. 가스절연 개폐장치는 전력계통 운전 중에 발생한 사고 전류를 차단하여 전력계통의 안정성 확보를 위해 사용되며, 계통의 정

상 작동을 위해서는 차단기가 원위치로 복귀해야 한다. 이 과정에서 계통의 과도현상으로 인해 투입 서지가 발생하며, 그 투입 서지로 인하여 계통이 불안정해지는 현상이 유발된다. 차단기 재투입에 의한 서지 발생을 저감시키고 계통의 안정성을 확보하기 위해 차단기와 동일한 상(Phase)에 투입 저항을 추가하여 투입 서지를 억제한다.

투입 저항은 차단기 외부 또는 내부에 설치되며, 동작 방식에 따라 차단기 구동 메커니즘과 동일한 메커니즘을 이용하는 방식과 별도의 조작 기

접수일: 2005년 5월 4일; 게재승인일: 2005년 9월 9일

교신저자: 충북대학교 기계공학부

E-mail: hycho@chungbuk.ac.kr Tel. (043) 261-2464

* LS산전(주)

** 충북대학교 정밀기계공학과

구를 사용하여 차단기 동작과 무관하게 구동하는 방식으로 나눌 수 있다. 또한 투입 저항의 접촉 방법에 따라 틀립 접점을 이용하여 가동부가 고정부에 삽입되게 하는 방법과 단순 접촉을 이용하는 방법 등이 있다. 단순 접촉형 투입 저항은 차단부와 연결되어 차단과 투입시 운동을 하는 가동부와 차단기의 고정부에 취부되는 고정 저항부로 구성된다. 고정 저항부는 가동부의 운동에너지에 의한 충돌에너지를 감쇠시킬 수 있는 스프링과 그 스프링을 감싸고 있는 케이스 및 서지 감쇠용 저항으로 구성되어 있으며, 만약 충돌 시 스프링에서 채터 진동이 발생 할 경우 투입저항에서 생기는 서지를 효과적으로 감쇠시키지 못해 계통의 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있다.

가스절연 개폐장치의 안정성 확보를 위한 많은 연구가 진행 중이다. Chen¹은 SF₆가스 차단기가 투입되었을 때 스프링 타입 매카니즘의 운동특성을 해석하였고, Lee² 등은 SF₆ 가스의 공진 주파수에 따른 신호 특성을 연구하였다. Lee³ 등은 362kV급 1점절 가스 차단기를 개발하였고, Kim⁴ 등은 탄소성 유한요소법으로 차단기 충격해석을 하였으며, Ochiai⁵는 유지 보수가 쉽고, 높은 전기신뢰성을 갖는 550kV급 1점절 가스 차단기를 개발하였다. 또한 Ahn⁶ 등은 차단기에 사용되는 스프링의 최적 설계에 관한 연구를 하였고, Legate⁷ 등은 EHV 회로 차단기에서 투입 저항을 제거하기 위한 연구를 하였으며, Kim⁸ 등은 단거리 송전선에서 투입 저항이 없는 저가형 차단기 사용에 관한 연구를 하였다. 위의 연구 성과에서 보듯이 지금까지의 연구는 주로 차단기의 구조 해석 및 기구학적 측면에 국한 되었으며, 투입저항으로 인한 서지 발생을 억제시키기 위한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구는 단순 접촉형 투입 저항의 가동부와 고정 저항부 간의 충돌 시 채터 진동에 의한 전기적인 서지를 감소시키기 위해 진행되었다. 가동부와 고정 저항부의 스프링상수, 감쇠계수, 가동부의 질량 등을 변화시켜 해석하였으며, 동특성 분석을 위한 실험을 병행하였다.

2. 동특성 해석

2.1 해석방법

충돌 시 가동부와 고정 저항부의 상태 변화를 해석하기 위해 동특성 해석 프로그램인 COSMOS MOTION(SolidWorks Corporation)을 이용하였으며, COSMOS MOTION의 해석 조건 등을 변화시켜 해석하였다. 해석을 위해 가동부와 고정 저항부 스프링의 스프링상수와 감쇠계수를 변화시켰으며, 충돌에너지와 질량의 연관성을 고려하여 질량의 변화를 통해 채터 진동을 감소시키고자 하였다. 해석의 초기 조건으로 가동부에 9.8m/s의 속도를 주어 고정 저항부에 충돌시켰으며, 고정 저항부와 가동부는 강체로 가정하여 충돌 시 충돌에 의한 변형은 없다고 가정하였다.

스프링상수의 변화를 통한 해석 과정은 고정 저항부의 스프링상수를 3.1N/mm를 기준으로 -30%, -20%, 5%, 10%, 15%, 20%, 30% 비율로 변화시켰으며, 가동부는 50N/mm인 스프링상수를 각각 -15%, -10%, -5%, 0%, 5%, 10%, 15% 비율로 변화시켰다. 해석은 각각의 경우에 대해 Fig. 1과 같이 순차적으로 하였으며, Fig. 1의 데이터는 위의 각 비율로 변화시킨 스프링 상수를 의미한다. 또한 감쇠계수는 고정 저항부가 0.6N-s/mm, 가동부가 5N-s/mm이었다. 해석 조건의 변경은 Fig. 2와 같은 과정을 통하였다.

감쇠계수의 변화를 통한 해석은 고정 저항부의 감쇠계수를 0.5N-s/mm, 0.6N-s/mm으로 변화시켰으며, 각각의 경우에 대해 가동부의 감쇠계수를 0.05N-s/mm, 0.1N-s/mm, 0.5N-s/mm, 1N-s/mm, 2N-s/mm, 5N-s/mm로 변화 시켜 해석하였다. 해석 과정과 해석 조건의 변경은 스프링상수 변화를 통한 과정과 같으며, 감쇠계수 변화 시 스프링상수는 가동부와 고정 저항부가 각각 50N/mm, 3.1N/mm이었다.

가동부의 질량 변화에 따른 해석은 가동부의 질량을 3.31kg, 3.41kg, 3.60kg, 3.69kg, 3.86kg, 4.14kg, 4.23kg, 4.42kg등으로 변화시켜 해석하였다. 해석 과정에서 스프링상수와 감쇠계수는 고정 저항부가 3.1N/mm, 0.6N-s/mm, 가동부가 50N/mm, 5N-s/mm로 일정하게 유지하였다.

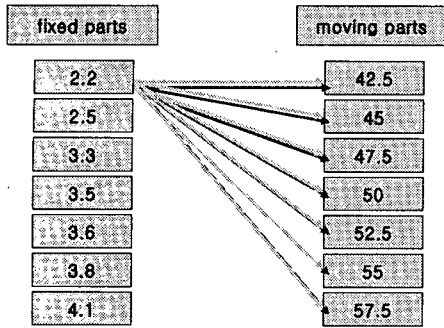


Fig. 1 Procedure of analysis for various spring constant(N/mm) of moving and fixed parts

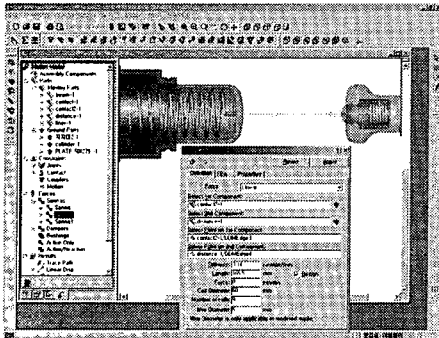


Fig. 2 Windows for input data

2.2 모델링

해석 대상은 362kV급 차단기이며, 3차원 설계 프로그램인 Solid Works을 이용 Fig. 3과 같이 모델링하였다. Fig. 3의 (a)는 가동부이고 (b)는 고정 저항부이다. 고정 저항부와 가동부는 SS400의 스테인레스강을 사용하였으며, SS 400의 탄성계수는 200GPa이고, 포아송비는 0.26이다. 또한 SS400의 항복강도와 최대 인장강도는 각각 200~230MPa과 400~450MPa이다.

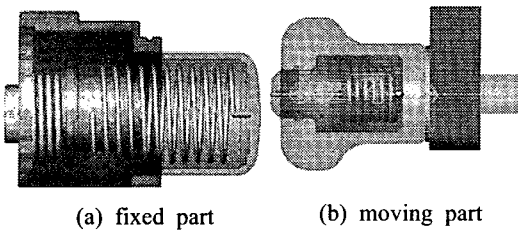


Fig. 3 3-D Modeling of closing resistor for 362kV Gas insulated switchgear

3. 동특성 해석 실험

고정 저항부와 가동부의 동특성 해석 실험은 Fig. 4와 같은 실제 가스절연 개폐장치를 사용하였다. 실험 장비는 Fig. 5의 고속 촬영용 카메라와 Image Analyzer, System Analyzer 등의 소프트웨어를 사용하였으며, 실험 장비의 자세한 특징은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of measuring system

Measuring System	Model
High speed camera	Motionextra HG-LE
Image analyzer	Image Express Vision V5.5y
System analyzer	PKE series Model

실험은 고속 촬영용 카메라를 이용하여 고정 저항부와 가동부에 Fig. 6의 (a)와 같이 등근 마크를 부착하고 시스템을 작동시킨 후 이들을 고속 촬영한다. 고속 촬영한 화면은 Fig. 6의 (b)와 같으며, 촬영 화면에서 등근 마크의 위치를 확인 하는 Image analyzer를 이용하여, 시간 변화에 따라 마크의 위치를 확인하고 위치 변화에 따른 그래프를 그린다. 또한 System analyzer를 이용하여 충돌 시 가동부와 고정 저항부의 전기 신호를 분석하여 시스템의 안정성 여부를 판별한다.

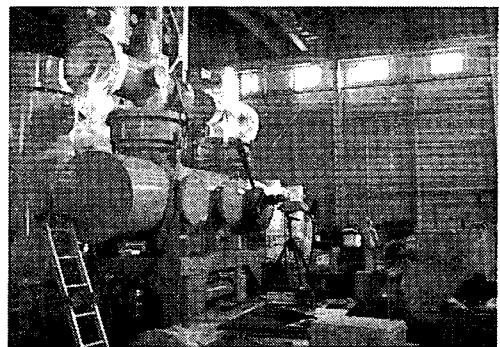
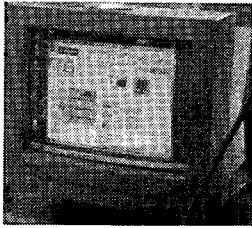


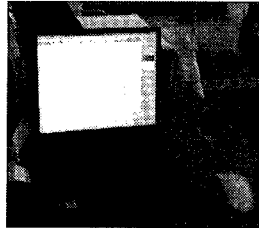
Fig. 4 Gas insulated switchgear



(a) high speed camera

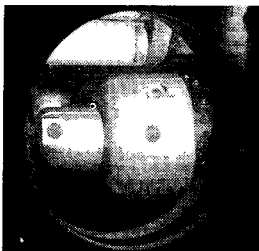


(b) image analyzer

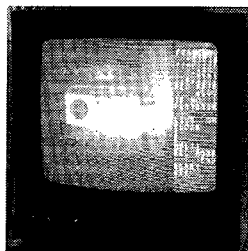


(c) system analyzer

Fig. 5 Data acquisition and analyzer systems



(a) attached point at fixed part



(b) pictures by high speed camera

Fig. 6 Data acquisition by using high speed camera

4. 결과 및 고찰

4.1 스프링상수 변화에 따른 해석 결과

스프링상수 변화에 따른 해석은 해석방법에서 언급한 것과 같으며, 여러 해석 조건에 대해 각각 시뮬레이션을 하였다. 해석 결과는 각각의 경우에 대해 충돌점과 충돌 후 최대 변위점을 확인하여 충돌에 의한 최대 이격 거리를 확인하였다. Fig. 7은 해석결과 중 가동부 스프링 상수가 42.5N/mm이고, 고정 저항부 스프링상수가 2.2N/mm 일 때의 결과 그래프이며, 위의 결과에서 채터 진동이

발생하는 순간의 진폭을 측정하여 이를 최대 변위라 하였고, 여기서의 최대 변위는 가동부와 고정 저항부의 이격거리를 의미한다. 또한 가동부와 고정 저항부의 충돌 시 채터 진동의 진폭이 크면 변위값이 커지고 변위값이 크면 가동부와 고정 저항부의 이격거리가 커져 예비 접점의 접촉시간이 짧아져 시스템이 불안해진다. Table 2는 각각의 해석 결과에서 최대 변위만을 종합한 결과이며, Fig. 8은 Table 2를 이용하여 가동부 스프링상수 변화에 따라 고정 저항부 스프링상수를 달리하여 각 경우에 대한 최대 변위 결과를 나타낸 그래프이다.

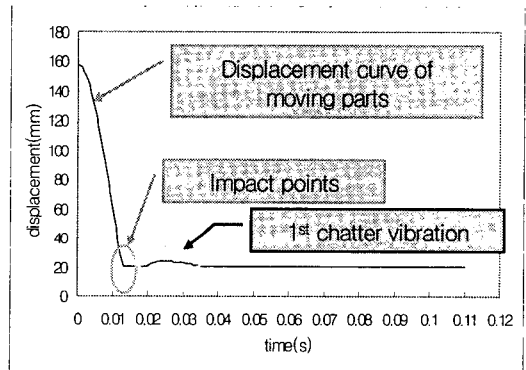


Fig. 7 Displacement curve of moving part (Spring constant : moving parts 42.5(N/mm), fixed parts 2.2(N/mm))

Table 2 Simulated maximum displacements between moving and fixed parts by varying spring constants(mm)

fixed parts	moving parts						
	42.5 (N/mm)	45 (N/mm)	47.5 (N/mm)	50 (N/mm)	52.5 (N/mm)	55 (N/mm)	57.5 (N/mm)
2.2(N/mm)	4.2	4.6	4.2	4.3	4.6	4.1	4.5
2.5(N/mm)	4.1	4.0	4.0	4.0	4.1	4.0	4.4
3.3(N/mm)	3.8	3.8	3.9	4.0	3.7	4.3	3.8
3.5(N/mm)	3.8	3.9	4.1	3.7	3.8	3.7	3.7
3.6(N/mm)	3.7	3.6	3.8	3.7	3.8	3.6	3.8
3.8(N/mm)	3.8	3.6	3.7	3.7	4.1	3.6	4.1
4.1(N/mm)	3.6	3.6	3.7	3.7	3.7	4.1	3.6

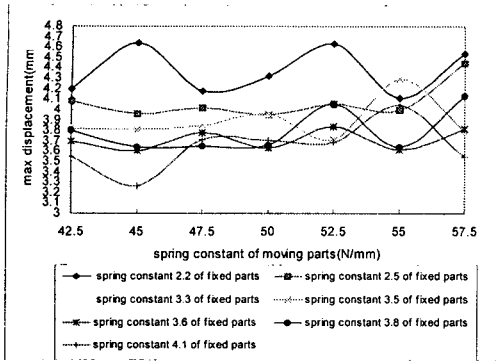


Fig. 8 Simulated maximum displacements between moving and fixed parts by varying spring constants

이번 해석을 통해 고정 저항부의 스프링 상수가 2.2 ~ 2.5(N/mm), 3.8 ~ 4.1(N/mm) 범위 일 때, 가동부의 스프링 상수는 40 ~ 42.5(N/mm), 57.5 ~ 60(N/mm) 일 때 안정적인 결과를 얻었다. 하지만 해석 결과에서 고정 저항부와 가동부의 스프링상수 변화에 따른 최대 변위가 규칙성을 갖지 못함을 알았다. 이는 고정 저항부와 가동부에 두개의 스프링이 있어 따로따로 운동을 하고 충돌 시 스프링의 진동 특성으로 인해 공진 현상과 간섭이 발생하였을 것이다. 즉 공진 현상과 간섭 때문에 충돌에너지가 갑자기 증가하였으며, 증가한 충돌에너지로 인해 해석 결과가 규칙적이지 않았을 것이다. 따라서 이번 해석에서는 규칙성보다는 여러 조건들 중에서 채터 진동을 감소시킬 수 있는 최적의 조건을 찾는 데 초점을 맞췄으며, 최적 조건을 찾기 위해 충돌 후의 고정 저항부와 가동부의 최대 거리 변화, 재결합 시까지의 소요 시간, 변화 기울기 등도 고려되었다.

4.2 감쇠계수 변화에 따른 해석 결과

동특성 해석을 위해 고정 저항부와 가동부의 감쇠계수를 변화시켜 시뮬레이션을 하였으며, 해석 결과는 Fig. 9와 같다. 이번 해석을 통해서 고정 저항부의 감쇠계수가 증가 할수록 전체적인 최대 거리 변화는 작아졌다. 이는 감쇠계수가 커질수록 채터 진동이 줄어들어 안정적인 상태가 되며, 고정 저항부와 가동부의 충돌 시 충돌에너지 흡수율이 높아져 빨리 정상상태가 됨을 의미한다. 하지만 고정 저항부의 감쇠계수가 커지면 전체 시

스템은 안정적인 상태가 되지만 가동부의 감쇠계수 증가 시에는 오히려 최대 변위가 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 감쇠계수가 크면 처음 충돌 시 충돌 에너지 흡수율은 높지만, 충돌 후 시스템이 불안정해져서 최대 변위가 오히려 증가한 것으로 생각된다. 또한 이와 같은 현상은 가동부에만 국한되는 것이 아니며, 고정 저항부의 감쇠계수도 현 해석 조건보다 커지면 같은 현상이 생김에 유의해야한다.

따라서 감쇠계수의 변화를 통한 해석에서도 일반적인 해석결과 보다는 적절한 조건을 찾는 것이 중요하며, 채터 진동을 증가시키는 감쇠계수는 가급적 피해 설계하는 것이 바람직할 것이다. 해석 결과와 같이 감쇠계수는 가동부보다 고정 저항부의 값이 채터 진동을 감소시키는데 더 큰 영향을 미치며, 가동부의 감쇠계수는 너무 크지 않은 0.5~2N-s/mm가 적합하다고 판단된다.

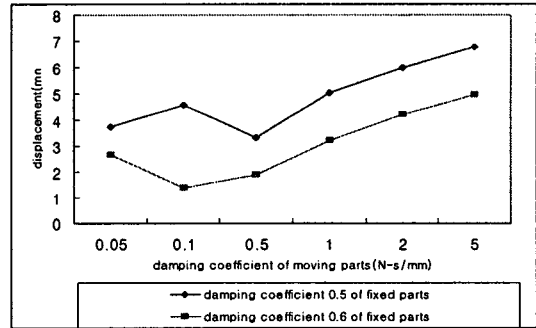


Fig. 9 Simulated maximum displacements between moving and fixed parts by varying damping coefficients

4.3 가동부 질량 변화에 따른 해석 결과

이번 해석에서는 채터 진동에 영향을 줄 수 있는 요인이 충돌에너지라 판단하여 충돌에너지의 변화를 통해 해석 결과를 얻고자 하였다. 해석 결과는 Fig. 10과 같으며, 해석 결과에서 보듯이 현재 가동부의 질량인 3.8kg에서 만족할 만한 결과를 얻었다. 만일 가동부의 형상을 변화하고자 한다면 3.8kg을 유지하면서 형상만을 변화하는 것이 안정적일 것이다. 충돌에 의한 변형이나 파괴 등을 고려하여 시스템을 보다 안정적으로 만들고자 한다면 총 질량을 약 4.1kg까지 늘려서 설계를 하는 것이 바람직 할 것이며, 시스템의 전체 질량을

줄여 경량화 하고자 한다면 총 질량이 약 3.4kg 일 때 안정적이었다.

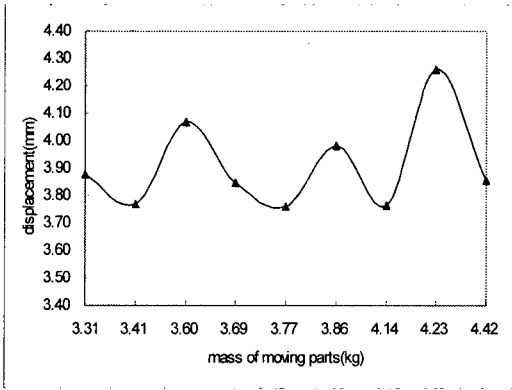


Fig. 10 Simulated maximum displacements between moving and fixed parts by varying mass of moving part

4.4 동특성 실험 결과

동특성 실험은 고속 촬영 카메라, Image analyzer 및 System Analyzer를 이용하였다. 실험 결과는 고속 촬영된 영상과 System Analyzer를 통해 얻은 결과를 분석하여 안정성 여부를 판단하였으며, 해석 결과는 Fig. 11, Fig. 12와 같다.

Fig. 11의 실험 결과는 Fig. 7의 해석 결과와 거의 유사했다. 가동부와 고정 저항부가 충돌점에서 충돌하고 약 100mm를 밀고 들어와 정지한 후 충돌에 의해 가동부와 고정 저항부 간에 충돌에너지 때문에 채터 진동이 발생하였으며, 채터 진동에 의한 최대 변위는 해석 결과와 거의 유사 하였다. 또한 실험 결과는 System analyzer를 이용해 검증되었다.

Fig. 12는 System analyzer를 이용하여 얻은 실험결과로 충돌 시 가동부와 고정부의 전기 신호를 분석 하면 시스템에 1차 및 2차 채터 진동이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이번 연구에서 주로 관심을 갖는 분야는 1차 채터 진동 부분이며, 이것은 충돌에 의한 채터 진동이다. 실험결과에서 보듯이 채터 진동은 약 7ms동안 발생하며, 이 시간이 실제 충돌이 일어나는 시간이다. 결과 그래프처럼 충돌 시 시스템의 전기 상태는 거의 일정한 진폭을 유지하였으며, 진동의 주기도 일정하였다. 이 결과를 통해 가동부와 고정 저항부의 충돌 시 채터 진동이 적게 일어났으며, 채터 진동에 의

한 시스템의 불안정성이 감소 된 것을 확인 할 수 있었다.

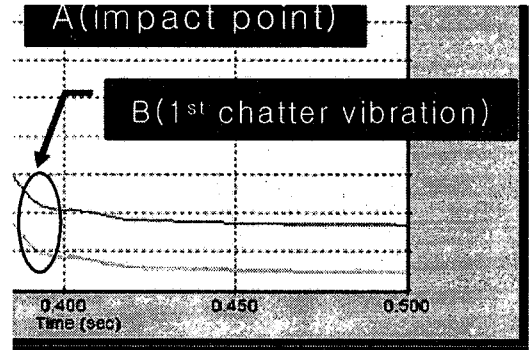


Fig. 11 Displacement of moving and fixed parts by high speed camera(Spring constant: moving parts 42.5(N/mm), fixed parts 2.2(N/mm))

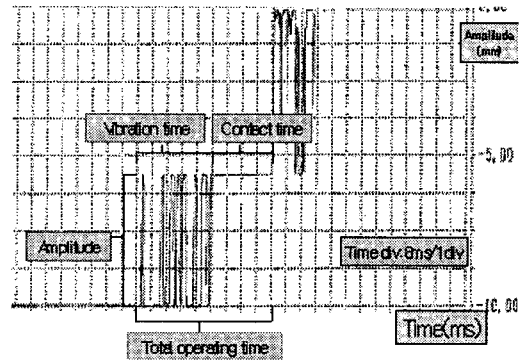


Fig. 12 Experimental results by using system analyzer

5. 결론

본 논문에서는 가스절연 개폐장치 투입저항의 동특성 해석을 위해 상용 해석프로그램인 COSMOS MOTION을 이용하였으며, 실제 가스절연 개폐장치를 이용한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 스프링상수 변화를 통해 채터 진동을 최소화 할 수 있는 스프링상수 범위를 찾았으며, 이 스프링상수의 사용으로 시스템의 안정성 확보와 서지를 감소시킬 수 있을 것이다. 이는 충돌 시

최대 변위, 고정 저항부와 가동부의 재결합 시간 등을 분석하여 얻은 결과이며, 고정 저항부의 스프링 상수는 2.2 ~ 2.5(N/mm) 및 3.8 ~ 4.1(N/mm) 영역에서 안정적 이었고, 가동부의 스프링 상수는 40 ~ 42.5(N/mm) 및 57.5 ~ 60(N/mm) 일 때 비교적 안정적이다.

2. 고정 저항부와 가동부의 감쇠계수를 변화시켜 해석한 결과 감쇠계수가 크면 채터 진동이 감소하였다. 하지만 감쇠계수가 해석결과 보다 크다고 좋은 것은 아니며, 감쇠계수가 클 경우 충돌 후 시스템이 안정화 되는데 오히려 오랜 시간이 걸렸으며, 감쇠계수가 큰 스프링의 제작 가능성 및 제작비용 등을 고려했을 때 좋지 않을 수 있다.

3. 가동부의 질량 변화를 통한 해석결과 시스템의 현 질량인 3.8kg이 충돌 시 비교적 영향을 덜 주는 안정적인 질량이며, 충돌을 고려해 시스템을 보다 안정적으로 만들고자 한다면 총 질량을 약 4.1kg까지 늘려서 설계를 하거나, 시스템의 질량을 줄여 경량화 하고자 한다면 총 질량이 약 3.4kg일 때 비교적 안정적이었다.

참고문헌

1. Chen, Fu-chen, "Dynamic response of spring-type operating mechanism for 69kV SF₆ gas insulated circuit breaker," Mechanism and Machine Theory, Vol. 38, pp. 119-134, 2003.
2. Lee, Y. H., Lee, H. D., Park, J. N., Shin, Y. S., Park, J. S. and Seo, J. M., "Characteristic as a Resonance Frequency of SF₆ Gas," Proceedings of the KIEE Summer Annual Meeting, pp. 112-114, 2003.
3. Lee, S. H., Min, K. S., Park, S. W., Kang, S. M., Lee, J. T., Park, K. Y., Shin, P. S. and Ko, D. S., "Development of Gas Circuit Breaker for 1 Break of 362kV 63kA 8000A," The Second National Symposium on Electric Power Apparatus, Materials and Their Application, pp. 120-122, 1998.
4. Kim, Y. G., Yoon, S. J., Moon, K. L. and Seo, J. M., "Impact Analysis of Circuit Breaker by an Elastic-Plastic FEM," Proceedings of the KIEE Autumn Annual Meeting, pp. 645-648, 1999.
5. Ochiai, I., Kohyama, H., Ito, H., Hidaka, M., Sugiyama, T., Yamamoto, H. and Matuszak, D., "Development of 550kV 63kA one-breaker gas circuit breaker," Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002 : Asia Pacific IEEE/PES, Vol. 1, pp. 93-98, 2002.
6. Ahn, K. Y. and Jeong, K. Y., "Optimization of the Spring Design Parameters of a Circuit Breaker for Satisfying Specified Dynamic Characteristics," Journal of the KSPE, Vol. 21, No. 3, pp. 132-138, 2004.
7. Legate, A. C., Brunke, J. H., Ray, J. J. and Yasuda, E. J., "Elimination of closing resistor on EHV circuit breakers," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, Issue 1, pp. 223-231, 1998.
8. Kim, J. B., Chung, Y. H. and Song, W. P., "The Study on Application of Circuit Breaker Without Closing Resister in Short Transmission Line," Trans. of KIEE, Vol. 53A, No. 1, pp. 31-37, 2004.