

PWM 제어용 고전압 릴레이의 테스트베드 설계

Testbed Design of PWM Controlled High Voltage Relay

김진광^{1*}

Jin-Kwang Kim^{1*}

〈Abstract〉

The purpose of this study is to develop a virtual testbed capable of predicting the functional performance of a linear electromagnetic actuator for a high voltage relay in order to reduce its development costs and time. The virtual testbed is defined by a multiphysics coupling approach in order to consider the complex interactions of multi-domains such as the solenoid model of electromagnets, the mass-spring-damper model of mechanical systems, the electric circuit model for an external control unit, and the thermal model for predicting temperature variations. The performances of the existing high voltage relay were estimated by the virtual testbed, and then the effectiveness and validation of the proposed testbed were discussed in comparison with the experimental test results. This study showed that the virtual testbed can be applied in design, optimization, and investigation of high voltage relays.

Keywords : Testbed, Multiphysics coupling analysis, PWM controller, Actuator, High voltage relay, Electric vehicle

^{1*} 정회원, 교신저자 타이코에이앰피 코리아
E-mail : jkkim@te.com

^{1*} corresponding Author, Tyco Electronics AMP Korea Co.,
Ltd.

1. 서론

고전압 릴레이는 하이브리드 및 전기 자동차들의 고용량 배터리 팩과 전기 컨트롤러 또는 모터 사이에서 고전류를 개폐하기 위해 사용된다. 12 VDC 전원으로 작동되고, 차량을 사용하지 않을 때는 배터리 팩과의 통전을 차단하는 기능을 담당한다. 고전압 릴레이의 접점은 솔레노이드 코일단의 전기에너지가 자기에너지로 변환됨에 따라 자기회로의 구동부가 자력에 의해 움직여 닫히고, 스프링 구성요소의 복원력에 의해 접점이 다시 열리게 된다. 이러한 유형의 전자장치는 일반적으로 구동부의 직선운동으로 선형 전자기 액추에이터라고 불리고, 구조의 단순성, 저렴한 비용 및 높은 내구 신뢰성으로 인해 전기 자동차의 고전압 전류의 개폐장치로 널리 사용되고 있다.

고전압 릴레이의 설계과정은 자기력의 비선형 거동이 구동부의 기계적 진동에 영향을 미치고, 또한 솔레노이드 코일의 전력손실로 인해 고전압 릴레이의 온도를 상승시키기 때문에 신중하게 고려되어야 한다. 이러한 릴레이를 최적설계하기 위한 방안으로 가상 시뮬레이션에 기반을 둔 접근법은 설계 프로세스의 초기단계에서 값 비싼 시제품을 제작하기에 앞서, 기본성능을 평가하고 분석할 수 있기 때문에 매우 유용한 설계 도구이다. 하지만 고전압 릴레이의 동작특성을 평가하기 위한 현재까지의 접근법들은 기계, 전자기 또는 열 모델들과 같은 단일 물리현상만으로 정의됨에 따라 실제 동작특성을 예측하기에는 그 신뢰성과 정확성이 다소 부족하다.[1-3] 실제 고전압 릴레이의 동작은 전자기, 구조, 전기 및 열 현상들의 상호작용에 따른 복잡한 다중물리 현상에 기반을 둔다. 따라서 성능예측 시뮬레이션을 성공적으로 수행하기 위한 전제조건은 전기제어 회로를 포함한 전체 시스템 수준에서 다중물리 현상들을 고려한

연성해석 접근법을 활용하여야 한다.

본 논문에서는 전자기, 구조, 전기 회로 및 열 전달 모델을 결합한 다중물리 연성해석 접근법을 기반으로 한 시스템 수준의 가상 테스트베드(testbed)를 제안한다.

2. 고전압 릴레이의 동작원리

Fig. 1 (a)은 고전압 릴레이의 단면도를 나타낸 것이다. 릴레이의 액추에이터 장치는 크게 전자기 시스템과 기계 시스템으로 구성된다. 전자기 시스템은 여자코일과 가동코어, 고정코어, 요크(Yoke) 및 에어-갭(air gap)으로 자기회로를 구성한다. 고전압 릴레이의 액추에이터는 보빈(bobbin)에 권선된 솔레노이드 코일에 여자전압을 인가하여 작동시킨다. 12 VDC는 코일권선에 전류를 생성시키고, 전류는 다시 자기회로의 폐쇄 루프경로를 형성하도록 에어-갭을 관통하는 자기장을 생성시킨다. 그리고 에어-갭을 통과하는 자기장은 구동부인 가동코어와 요크 플레이트(yoke plate) 사이에 인력을 발생시켜 가동코어를 끌어당기게 된다.

한편, 기계 시스템은 선형운동을 구현할 수 있도록 가동코어-샤프트(shaft) 어셈블리와 두 개의 스프링으로 구성된다. 가동코어가 중심선을 따라 상향 방향으로 이동함에 따라, 탄성변형에너지는

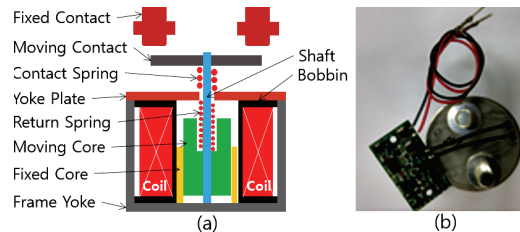


Fig. 1 Structure of high voltage relay:
 (a) Cross-sectional area,
 (b) Micro-controller economizer

복귀스프링에 동시에 저장되어 스위치 오프 시에 개방상태로 복귀하게 된다. 또한, 점압스프링에 저장된 변형에너지는 고전류의 통전으로 인한 전자 반발력에 대해 두 점점에 충분한 힘을 가함으로써 폐쇄상태를 유지할 수 있도록 작용한다.

에너지 관점에서 살펴보면, 입력전력은 자력으로 변환되지만 또한, 코일권선 내에 원치 않는 열 에너지로도 변환된다. 결국, 고전압 릴레이의 열원으로 작용함에 따라 릴레이 성능저하의 주요인이 된다. 릴레이 점점을 닫힌 상태로 유지하는 데 필요한 자력보다 초기에 스위치-온 동작과정동안 릴레이를 구동시키는데 더 큰 자력이 소요된다. 따라서 릴레이의 점점이 닫힌 후에는 닫힌 상태를 유지할 수 있는 최소한의 입력전력만을 사용하기 위해 필연적으로 외부회로를 사용하여야 한다. Fig. 1 (b)은 릴레이 점점이 초기 닫힘 후에 입력전력의 양을 줄임으로써 적절한 자력세기로 줄이기 위해 코일의 동작전압을 PWM 제어 할 수 있는 마이크로 컨트롤러 이코노마이저 (micro controller economizer, MCE)의 회로보드를 나타낸 것이다.

이러한 방식으로, 고전압 릴레이는 다중물리의 상호작용에 의한 복잡한 동작 메커니즘을 통해 작동된다. 이러한 이유로 본 연구에서는 다중물리 연성해석 접근법을 기반으로 고전압 릴레이의 성능을 예측할 수 있는 시스템 레벨의 가상 테스트베드를 개발하였다. Fig. 2에 나타낸 가상 테스트베드는 PWM 제어회로, 전자기 모델, 구조 모델 및 발열 모델을 실시간으로 함께 고려할 수 있는 새로운 접근법이다. 이 가상 테스트베드는 각각의 다중물리 모델들과 실시간 상호작용을 통해 릴레이의 실제 동작성능을 평가한다.

3. PWM 제어를 고려한 테스트베드

그림 2 (a)에 나타난 외부 회로모델은 전압원, 저항기, 제너-다이오드(Zener diode) 및 PWM 제어기를 포함한다. 솔레노이드 코일에는 12 VDC의 전원이 공급된다. 코일전압이 스위치 오프 되는 순간, 솔레노이드 코일에 저장된 전기에너지는 매우 높은 전압 피크를 발생시킨다. 따라서 제너-다이오드는 전압이 특정 값 이상으로 상승할 때 역방향으로 전류가 흐르지 않도록 차단하기 위해서 사용된다. 회로모델의 PWM 제어기는 외부회로의 주어진 주파수에서 DC 전압원의 듀티 비 (duty ratio)를 변경하여 유효 적정전압을 조정하는 기능을 가지고 있다. 결과적으로 이 회로 모델은 릴레이의 과열을 방지하기 위해 적절한 수준으로 코일 전류를 제어하는 역할을 수행한다.

그림 2 (b)의 솔레노이드모델은 회로모델의 여기 전압에 의해 실행된다. 솔레노이드 코일에서 쇠교 자속(magnetic flux linkage) λ 는 코일전류 i 와 가동코어 위치 x 에 의존한다. 전압 V 는 다음과 같이 λ 로 나타낼 수 있다.

$$V = i \cdot R + \frac{\partial \lambda(x, i)}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \lambda(x, i)}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

여기서, R 은 코일저항을 나타낸다. 식 (1)에서 첫 번째 항은 오믹(Ohmic) 전압, 두 번째 항은 전류의 변화로 인한 유도전압, 세 번째 항은 dx/dt 의 가동코어 운동에 의한 속도전압을 의미한다. 3항의 운동 유도기전력은 입력전기로부터 기계적 출력으로의 에너지 전달역할을 담당한다. 이러한 이유로 솔레노이드 코일의 전류흐름은 에어-갭을 닫거나 열리는 가동코어의 운동으로 인해 속도전압의 영향을 받게 된다. 일반적으로 솔레노이드 코일의 전류흐름 상태는 2항과 3항의 유도기전력에

따라 4 단계로 분류 할 수 있다. 첫 번째 단계에서 코일전류는 기하급수적으로 상승하기 시작하지만 가동코어는 전혀 움직이지 않는다. ($x = 0$ 에서 $di / dt \neq 0$). 그 후, 제 2 단계 ($di / dt \neq 0$ 및 $dx / dt \neq 0$) 동안, 가동코어가 이동하고, 가동코어가 정지할 때까지의 움직임에 의해 전류가 감소하는 경향을 보인다. 3 단계 ($x = x_L$ 에서 $di / dt \neq 0$)에서는 3항의 유도 기전력의 영향은 없으며 코일 전류는 지수 함수적으로 다시 증가한다. 마지막으로 $x = x_L$ 에서 $di / dt = 0$ 의 조건에서 전류는 옴직전압에 의해서만 결정된다. 이 과정에서 가동코어에 작용하는 자력 F_{mag} 는 다음 식으로부터 결정할 수 있다.

$$F_{mag} = \frac{\partial \lambda(x, i_0)}{\partial x} i_0 = E(x, i_0) \cdot i_0, \quad (2)$$

$$\lambda(x, i_0) = \int_0^{x_i} E(x, i_0) dx$$

여기서 i_0 은 암페어-턴의 기자력과 관련된 특정전류를 의미한다. 액추에이터의 쇄교는 전류 i 및 가동코어 위치 x 와 비선형관계가 있다. 따라서 이러한 관계는 유한요소해석을 기반으로 한 Fig. 2 (b)의 솔레노이드 모델에 의해 계산된다.

고전압 릴레이는 자체발열 혹은 주변온도 변화에 따라 동작특성이 달라진다. 즉, 솔레노이드의 코일권선은 구리선이기 때문에 코일저항은 구리의 온도계수 α_{cu} 에 따라 변하게 된다. 코일저항의 온도에 대한 변화는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_{coil}(T) = R_{coil}(T_0)(1 + \alpha_{cu}), \quad (3)$$

$$\alpha_{cu} = 1 / (T_0 + 234.5)$$

여기서, R_{coil} 은 온도 T 에서의 코일저항이고, T_0 은 실내온도이다. $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 $\alpha_{cu} = 0.003929$ 이다. Fig. 2 (b)에 나타난 솔레노이드 모델은 주어진 가동코어 변위 x , 여자전압 V 및 코일온도 T 의 조건 하에서 자력 F_{mag} , 전류 i 및 전력 P 를 결정하고, 연성 물리모델들의 입력 하중 값으로 사용된다.

가동코어의 운동 상태는 Fig. 2 (c)에 표시된 질량 - 댐퍼 - 스프링 모델로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_p \ddot{x}(t) = F_{mag}(t) - C_p \dot{x}(t) - K_{eq} x(t) - M_p g, \quad (4)$$

$$K_{eq} = K_R \quad (0 \leq x \leq x_C),$$

$$K_{eq} = K_R + K_C \quad (x_C \leq x \leq x_L)$$

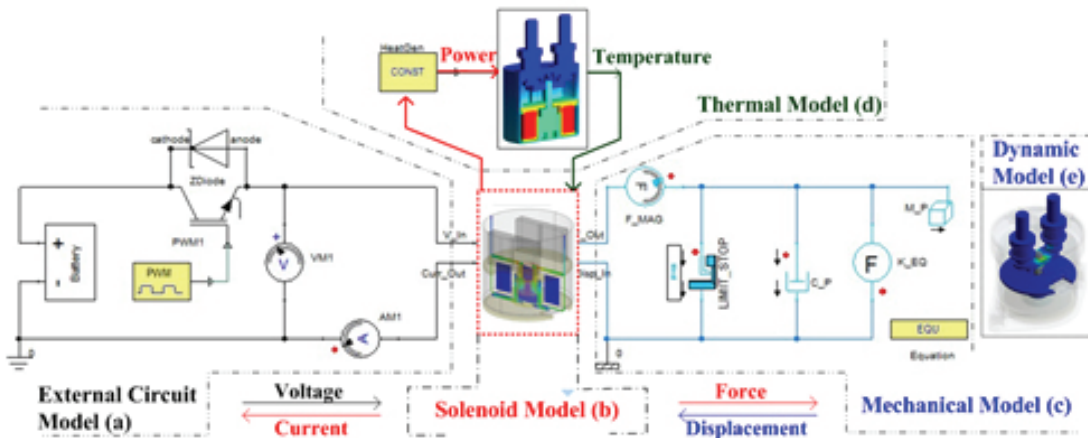


Fig. 2 Virtual tester for evaluating the performances of HV actuator

여기서 M_p 는 가동코어 어셈블리의 질량, K_R 및 K_C 는 복귀스프링 및 접압스프링 상수, C_P 는 선형 감쇠계수, g 는 중력상수를 나타낸다. 스프링들은 사전 압축력으로 가동코어에 조립되고, 복귀스프링 및 접압스프링의 각 스트로크(stroke)는 각각 x_L 및 x_C 이다. 움직이는 가동코어의 순간위치 $x(t)$ 는 솔레노이드 모델에서 전달된 $F_{mag}(t)$ 로 계산되고 변위 값은 솔레노이드 모델로 다시 전달되게 된다. Fig. 2 (e)의 동적 유한요소모델에 솔레노이드 모델의 $F_{mag}(t)$ 를 시간의존하중 값으로 입력하여 ON-OFF 프로세스에서 접점의 바운스(bounce) 횟수, 바운스 시간 및 응력분포 상태를 검토할 수 있다.

전산유동해석(CFD)은 고전압 릴레이의 주변공기의 유체흐름과 열전달을 고려한 보다 세밀한 발열상태를 평가할 수 있다. 하지만 CFD는 고전압 릴레이 내부의 전기-열 상호작용에 따른 적절한 열원 메커니즘을 정의할 수 있는 방법이 없다. 따라서 릴레이의 발열과정을 실시간으로 평가하기 위해서는 코일에서 발생하는 순시전력 값이 필요하다.[4] 이러한 이유로, 식 (3)에 기초한 솔레노이드 모델에 의해 결정된 전력 P 값이 매 시간 단계 내의 열원입력 값으로서 Fig. 2 (d)의 열전달 모델로 보내진다. 열전달 모델은 이와 같이 실시간 열원을 기반으로 하여 릴레이의 온도분포를 결

정하고, 온도변화에 따라 달라지는 코일저항 값을 결정하기 위한 입력온도 값으로 솔레노이드 모델에 실시간으로 전송된다.

이러한 상호작용 프로세스를 통해 제안된 가상 테스트베드는 고전압 릴레이의 온도의존 성능을 평가할 수 있다.

4. 가상 테스트베드의 검증

제안된 가상 테스트베드의 그 유효성과 정확성을 평가하기 위해 고전압 릴레이 제품을 사용하여 다양한 작동조건 하에서 실험을 수행하였다. Fig. 3에 나타난 시험장비들을 사용하여 릴레이 온도, 코일 전압 및 전류를 측정하였다. 특히 가동전극의 움직임은 광섬유 센서를 사용하여 모니터링 하였다. Fig. 1 (b)의 PWM 제어기 보드는 초기 스위치 온 후, 코일의 작동 전압을 홀드(hold) 전압 수준으로 감소시키는 데 사용하였다. Fig. 4는 코일 전압과 전류의 응답곡선과 주위온도 22 ° C에서 가동전극의 실시간 변위상태를 보여준다. 가동코어의 동작은 전술 한 바와 같이 point 1에서 식 (1)의 3항의 유도기전력 값이 생성되고, 코일에 흐르는 전류를 감소시키기 시작한다. point 2에서, 가동접점이 고정접점과 접촉한 후, 가동코어

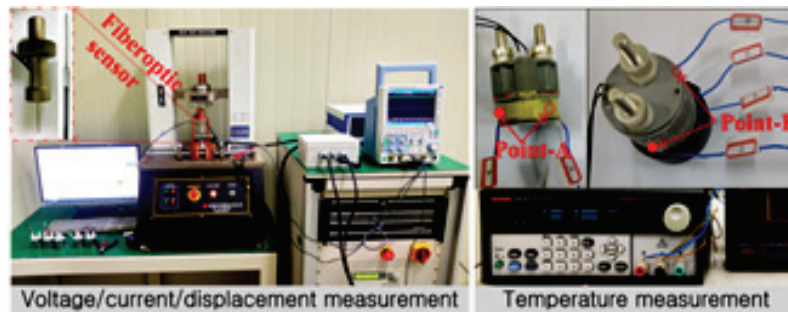


Fig. 3 Test equipment for measuring the relay temperature, coil voltage, and current

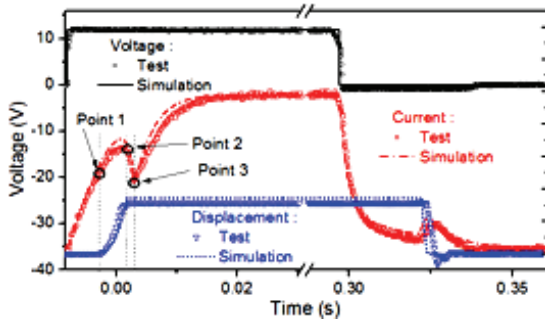


Fig. 4 Comparison of the results between simulation and experiment

가 point 3의 최종 닫힘 위치에 도달하면서 그 운동에너지를 소음, 바운스 및 구조변형 등의 에너지들로 소산시키게 된다.

Fig. 5는 85 ° C의 주변온도에서 제안된 다중물리 연성해석에 기반을 둔 테스트베드의 정확성과 타당성을 검증하기 위해 실험 데이터와 함께 나타낸 것이다. 예측결과가 실험결과와 매우 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

이러한 결과로부터 제안된 다중물리 연성해석 접근법에 기반을 둔 고전압 릴레이의 가상 테스트베드는 릴레이의 온도변화를 정확하게 예측할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 연구의 목적은 시제품을 제작하기에 앞서 개발 시간과 비용을 획기적으로 줄이기 위한 PWM 제어용 고전압 릴레이의 동작성능을 예측할 수 있는 새로운 가상 테스트베드를 개발하는 것이다.

이 연구에서 제안된 다중물리 연성해석 기법을 활용한 새로운 가상 테스트베드는 상온 및 고온조건 하에서 고전압 릴레이의 동작성능을 정확하게 예측 할 수 있음을 보였다.

고전압 릴레이에 대한 다중물리 연성해석 접근

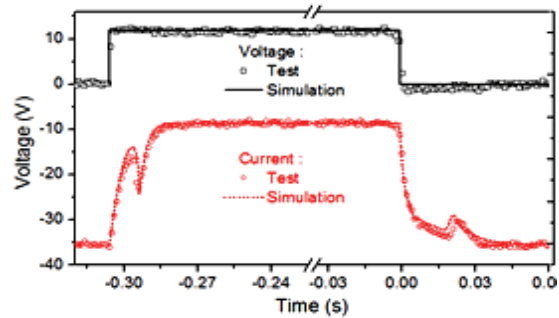


Fig. 5 Coil voltage and current under high ambient temperature of 85 °C

법에 대한 연구결과가 전무한 상태에서 제안된 가상 테스트베드는 고전압 릴레이의 연구개발에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] H. W. Joo, Y. H. Eum, H. T. Park, and S. Park, "Dynamic analysis of linear electromagnetic solenoid for Electric Vehicle Relay," Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference, pp. 1-4, (2010).
- [2] V. Mateev, A. Terzova, and I. Marinova, "Design analysis of electromagnetic actuator with ferrofluid," Electrical Apparatus and Technologies (SIELA), 2014 18th International Symposium, pp. 29-31, (2014).
- [3] S. J. Park, S. H. Lee, and J. H. Kim, "Study on Transformer and Inductor Using Equivalent Air gap to Partial Flux Saturation," Journal of the Korean Society of Industry Convergence, Vol. 17, No. 3, pp. 103-112, (2014).
- [4] J. K. Kim and C. S. Lee, "Co-simulation approach for analyzing electric-thermal interaction phenomena in lithium-Ion Battery," Int. J. Precis. Eng. Manuf. – Green Tech., Vol. 2, No. 3, pp. 255-262, (2015).

(접수: 2017.10.02. 수정: 2017.11.14. 게재확정: 2017.11.24.)