

전력변환차단기의 트리거 기구 최적화

조두현(고려대 대학원 기계공학과), 김권희(고려대 기계공학과)

Optimization of a Mechanism for Power Transfer Breakers

D. H. Cho (Korea Univ.), K. H. Kim (Korea Univ.)

ABSTRACT

PTB(Power Transfer Breaker) is a device which incorporate the functions of ACB(Air Circuit Breaker) and ATS(Automatic Transfer Switch). ACB is a circuit breaker against overload and ATS is a switching device to transfer the load between two electric power sources. An existing PTB design based upon the 5 bar & cam mechanism has been regarded to be too complex and thus a simpler 4 bar mechanism with trigger lock is proposed. Experimentation and optimization of the trigger lock is presented.

Key Words : Circuit Breaker(회로차단기), Power Transfer Breaker(전력변환차단기), ACB(기중차단기), VCB(진공차단기), ADAMS, Taguchi(다구찌), Trigger, Optimization(최적화)

1. 서론

전력전환차단기(Power Transfer Breaker, PTB)는 수 백 내지 수 천 암페어(Ampere)의 정격전류를 순간적으로 전력선에서 비상 발전기로 또는 그 반대로 이관시키는 기능과 과부하에 대한 회로차단기의 역할을 한다. 이는 기존의 자동전환장치(Automatic Transfer Switch, ATS)와 기중차단기(Air Circuit Breaker, ATS)의 기능을 통합 구현한 장치이다. 전력전환차단기 한 대로 자동전환장치 한 대와 두 대의 기중차단기를 대체함으로써 설치 공간과 비용을 절약하고 사용상의 편리성을 도모하고 효과적인 관리를 기대할 수 있다.

이러한 장치들은 수 백 내지 수 천 암페어의 부하 전류를 허용 시간(close: 50ms, open: 40ms) 이내에 고속으로 하나의 전원에서 다른 전원으로 전환시켜야 하므로 절대적인 신뢰성과 내구성을 가져야 한다. 이러한 장치의 개발 과정에서 1 차 설계는 기존의 기중차단기에서 사용하고 있고 신뢰성이 입증된 캠 및 5 절 링크 기구(Cam & 5 bar linkage)를 채택하여 수행되었다.

1 차 설계에 근거하여 제작된 전력전환차단기는 당초 의도대로 소기의 목적을 달성 할 수 있었으나 기구가 복잡하여 제작하기가 어렵고 비용이 많이 드는 문제점이 발견되었다. 또한 기능 통합으로 기대되는 부품의 감소 효과가 크지 않았다. 이러한 현실적인 판단에 따라 기존 기구의 신뢰성을 유지 하면서 부품수가 보다 적은 설계를 모색하게 되었다. 이러한 노력의 일환으로 4 절 기구 (4 bar linkage) 및 트리거 잠금 기구(trigger lock)를 이용한 2 차 설계가 제안되었고 시제품이 제작되었다. 시제품의 작동 시험 결과 트리거 잠금 기구가 제대로 작동하지 않는 문제점이 발견되었다.

이 논문에서는 2 차 설계의 문제점을 파악하고 트리거 잠금 기구의 오작동 원인을 분석한다. 메커니즘 부분 시제품에 대한 반발계수 실험, 다구찌법(Taguchi method) 및 수치 모의 실험(numerical simulation) 등을 이용하여 트리거 잠금기구의 최적화 방향을 모색하고 오작동 문제를 극복한다.

2.2 차 설계 전력전환차단기 분석

2.1 전력전환차단기의 트리거 기구 구조 및 작동원리

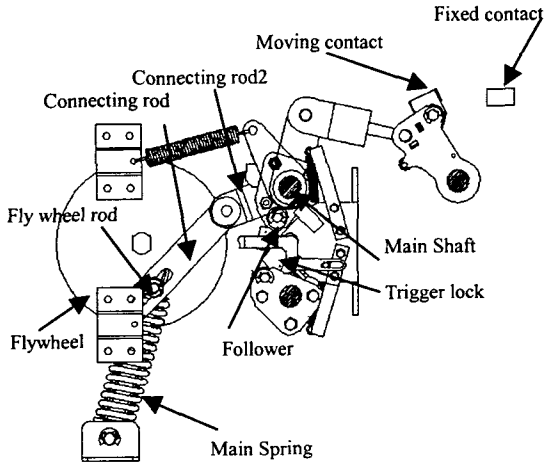


Fig. 1 A 4 bar linkage and trigger lock mechanism

Fig. 1 은 트리거 기구의 구조를 보여 주고 있다. 주 스프링(main spring)의 탄성에너지를 이용하여 플라이 휠(flywheel)과 4 절 링크를 구동하며 이동 접점(moving contact)을 고정 접점(fixed contact)으로 이동시켜 준다. 이동 접점이 고정 접점으로 붙는 순간 잠금 기구가 팔로워(follower)에 걸려서 접점 들간의 결합해제를 막는다. 트리거를 통하여 잠금을 해제하면 해제 스프링(opening spring)과 이동 접점 안에 있는 스프링의 힘으로 접점들이 결합해제 되어 전력 회로를 차단시킨다.

2.2 수치해석을 위한 변수 측정

4 절 링크 및 잠금 트리거 장치의 강제 수치 모델에서 강제 간의 반발계수가 중요한 변수이다. 실제의 충돌 현상을 구현하기 위해서 반발계수를 측정하였다. 실험에는 부분적으로 제작된 트리거 잠금 기구를 사용하였고 가속도 센서와 오실로스코프(Oscilloscope)를 이용하여 충돌 반발계수를 측정하였다. 수치 모델에서 실험치와 같은 충돌특성이 나오는 반발 계수를 찾았다. 충돌 간격은 처음 약 15.2ms, 두 번째 약 12ms 이다.

강체간의 접촉 조건은 Normal force : impact, Stiffness : 1.0E7 N/mm, Force exponent : 1.5, Damping : 100 N-sec/mm, Penetration depth : 0.01 mm 이다.

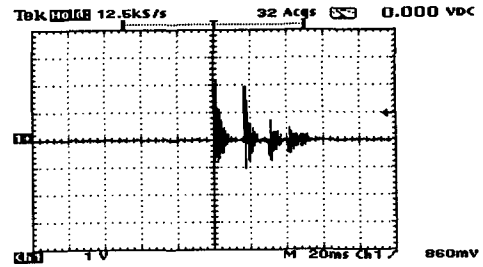


Fig. 2 Measured acceleration - time plot for the trigger lock subassembly

2.3 잠금 기구 오작동 원인 분석

측정된 충돌 특성을 기초로 잠금 기구의 오작동이 알려진 설계를 수치 모델로 표현하였다.

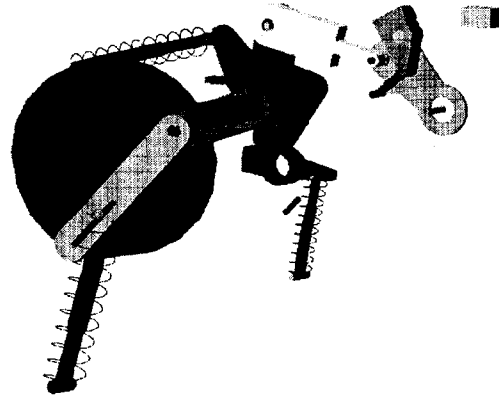


Fig. 3 Dynamic analysis model for the 2nd design

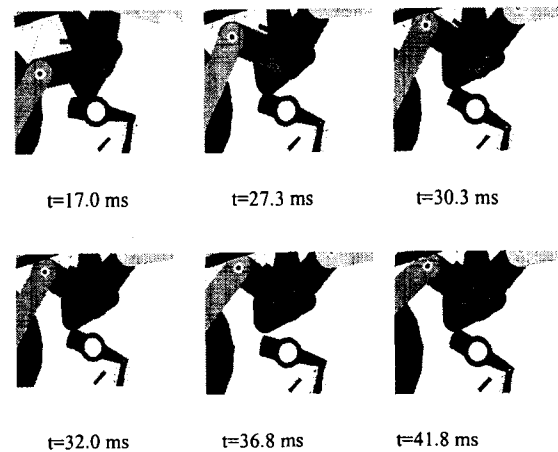


Fig. 4 Operation sequence of the trigger lock mechanism (2nd design of the PTB)

Fig. 3 은 동적 해석을 위한 수치 모델이며, Fig. 4 는 해석 결과이다. 플라이 휠 로드(flywheel rod)가

도는 순간 커넥팅 로드(Connecting rod)에 충격을 가해 플라이 휠의 회전 속도보다 빠르게 움직여서 이동 접점에 운동에너지를 전달하게 된다. 이동 접점의 예정보다 빠른 움직임과 고정 접점과의 충돌 반로 잠금 기구가 팔로워 밑으로 들어가는 순간 팔로워가 잠금을 방해하는 방향으로 움직여서 잠금 기구가 작동하지 않게 되는 것을 알 수 있었다.

3. 다구찌법을 이용한 최적화

3.1 실험계획

트리거가 안정되게 작동할 수 있는 설계변수를 찾아내야 한다. 플라이 휠 로드와 커넥팅 로드와의 충격으로 인해 커넥팅 로드가 플라이 휠 로드의 속도보다 빠르게 움직이지 못하게 커넥팅 로드 조인트와 플라이 휠 로드 사이에 스프링을 설치 한다.

Fig. 5 를 보면 트리거 팔로워의 위치가 주축(main shaft) 쪽으로 가까이 위치하면 트리거의 초기 위치가 트리거가 걸렸을 때의 위치에 좀더 가까워지므로 트리거가 초기위치에서 걸리는 위치까지의 작동 시간을 줄일 수 있을 것으로 추측할 수 있다.

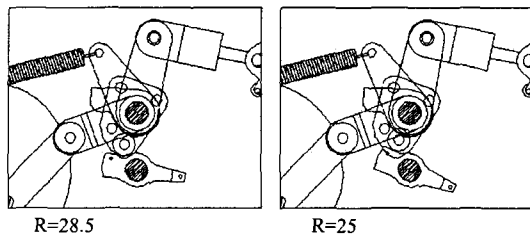


Fig. 5 Trigger starting position variation according to Trigger follower position.

Table 1. Control Parameters for $L_9(3^4)$

Symbol	Parameter	Level 1	Level 2	Level 3
A	Trigger follower position	R25	R26.5	R28.5
B	Fly wheel inertia	100%	200%	300%
C	Trigger return spring stiffness	0.8219 N/mm	1.2329 N/mm	1.6438 N/mm
D	Space between Trigger & Trigger follower	0 mm	0.5 mm	1.0 mm

플라이 휠의 관성력 또한 중요한 설계 변수로

생각된다. 처음 출발 속도를 늦추면 커넥팅 로드의 충격력이 약해지고, 이동 접점이 고정 접점으로 들어가게 하는 운동에너지의 효율적인 사용이 예상된다.

3.2 수치해석을 위한 모델링

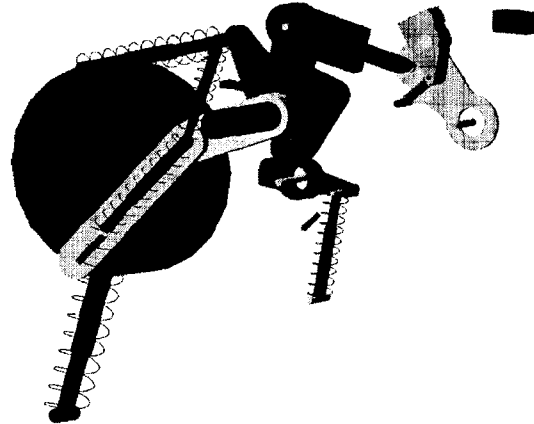


Fig. 6 Dynamic analysis model for the 2nd modified design

Fig. 3 과 비교해보면 커넥팅 로드의 자유로운 운동을 구속하는 스프링 두 개가 추가로 달려있는 것을 볼 수 있다.

3.3 다구찌법을 적용한 실험

3.3.1 1 차 실험

앞 절에서 설정한 변수를 직교 좌표계의 조합에 따라 모의 수치 해석을 한다.

Table 2. Orthogonal array with test result

Run.	A	B	C	D	Trigger Operation
1	1	1	1	1	Fail
2	1	2	2	2	Fail
3	1	3	3	3	Fail
4	2	1	2	3	Fail
5	2	2	3	1	Fail
6	2	3	1	2	Fail
7	3	1	3	2	Fail
8	3	2	1	3	Fail
9	3	3	2	1	Fail

9 번의 실험 결과 모든 조합에서 트리거는 걸리지 않았다. 하지만 실험 데이터를 바탕으로 트리거가 걸리기 위한 조건을 분석하고 알맞은 목적함수

를 설정하고 목표치에 가장 근접한 값을 내는 조합을 찾아야 할 것이다.

3.3.2 목적 함수 설정

트리거가 작동하기 위해서는 충분한 작동 시간, 여유 공간, 작동 거리 등이 적절한 타이밍과 함께 동시에 만족해야만 트리거가 작동할 수 있을 것이다.

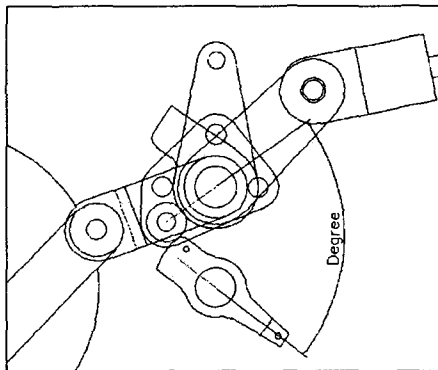


Fig. 7 Relative angle between follower and lock

Fig. 7 에서 이동 접점이 최대로 고정 접점에 붙는 순간, 주축 - 팔로우와 잠금 기구 간의 상대 각 (θ)이 크면 트리거가 들어가는 데 유리하다. 이 순간의 잠금 기구의 각속도(ω) 또한 트리거가 들어가는 데 중요한 요인이 될 수 있다. 다음으로 이 순간부터 팔로우와 잠금 기구가 다시 만나는 시점까지의 시간, 즉 이동 접점이 반발에 의해 다시 튀어나와 팔로우와 잠금 기구가 다시 만나는 시점까지의 시간(t) 또한 중요한 요인이 될 것이다.

Table 3. Measurement array with objective function.

Run.	t (sec)	ω (rad/s)	θ (degree)	f
1	0.000849	-2983.3	66.7743	-169.127
2	0.001026	-3927.2	74.001	-298.173
3	-0.00016	935.57	81.4744	-12.1198
4	0.001109	-5197.5	68.7445	-396.245
5	-0.00133	-379.52	69.8167	35.32028
6	0.001271	-3817.5	67.2726	-326.41
7	0.000915	-7674.4	68.6269	-481.903
8	0.001719	-7999.8	80.0001	-1100.16
9	-0.001	-14.367	64.8162	0.931214

그러므로 목적 함수는 $f = (\omega, t, \theta)$ 와 같이 나타낼 수 있으며 트리거 작동 성공 여부는 각 변

수의 값에 비례해서 나타난다고 가정했다. $f = \omega \times t \times \theta$ 로 나타낼 수 있다.

Table 3. 에 각 실험에서의 ω, t, θ 의 값을 측정하고 목적 함수 f 의 값을 계산해 놓았다.

3.3.3 평균값 분석

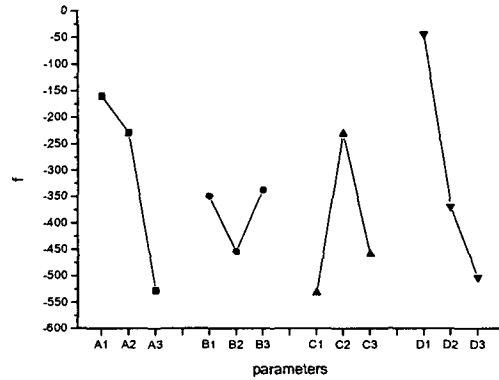


Fig. 8 Result of mean value analysis

목적 함수 f 의 값은 작을수록 트리거 동작에 유리하다. 그러므로 각 변수의 민감도 분석 결과 최적의 조합은 A3, B2, C1, D3 or A3, B2, C3, D3 이다. 그러나 A3, B2, C1, D3 의 조합은 run8 의 조합으로 트리거 작동 실패의 조합으로 앞 실험 결과에서 나왔다. 따라서 남은 가능성은 A3, B2, C3, D3 이며 이에 대한 모의 해석 결과는 다음과 같다

θ 가 최대가 될 때의 $t_1 = 0.0397$ sec,
 $\theta = 73.6949^\circ$, 트리거 팔로우와 트리거가 컨택이 발생하는 $t_2 = 0.04026$ sec,
 $f = (0.04026 - 0.0397) \times 73.6949 \times (-7176.1)$
 $= -1533.$

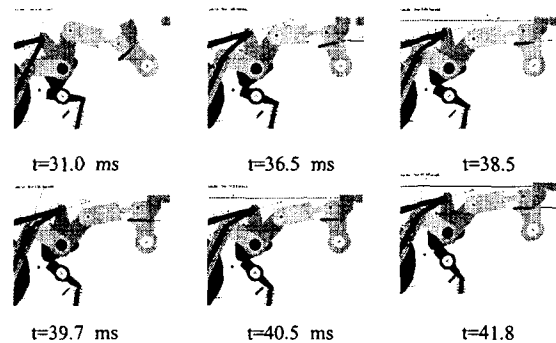


Fig. 9 Operation of optimized PTB model.

Fig. 9 를 보면 다구찌법을 이용하여 찾은 조합의 트리거기구가 작동하는 것을 보여주고 있다.

4. 결론

전력변환차단기의 트리거 기구의 작동 성능에 영향을 미치는 4 개의 설계인자에 대해 다구찌법을 이용한 최적 조합을 찾아 모의 실험을 하였다.

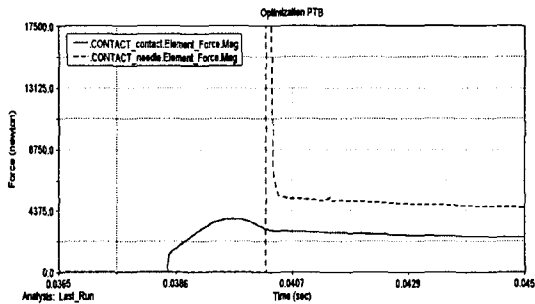


Fig. 10 Performance of optimized PTB model

Fig. 10 은 다구찌법을 이용해 찾은 최적 조합을 가지고 모의 실험을 하여 얻은 그래프이다. 실선은 이동 접점과 고정 접점간의 접점력을 나타낸 것이고, 점선은 트리거와 트리거 팔로우워와의 접점력을 나타낸 것이다.

약 38.5ms 에 이동접점이 고정 접점과의 접촉이 이뤄지고 있다. 접점의 닫힘 시간이 50ms 이내에 이뤄져야 하는 조건을 만족하고 있다. 접점간의 접촉력은 접점 16 개를 기준으로 약 153.3N 이다. 설계 기준치 약 109.3N 이상을 만족 하고 있다.

트리거는 약 40.3ms 에서 완전히 들어간 것을 알 수 있다. 트리거를 누르는 힘은 약 4598N 이다.

베어링과의 마찰계수를 0.001~0.01 이라고 가정하면 잠금 해제 토크는 약 1.6 Nmm ~ 16.0 Nmm 로 별 무리 없이 해제가 가능할 것으로 보인다.

다구찌법을 이용해 최적 설계된 4 절 링크 - 트리거 잠금 기구를 이용한 전력변환차단기는 캠 및 5 절 링크를 이용한 전력변환차단기와 같은 작동성과 신뢰성을 가지고 있으며, 구조가 단순하여 당초 설계의 목적과 부합한다고 판단된다.

참고문헌

1. 김경선, " 전력변환차단기의 최적 설계" 고려 대학교 기계공학과, December 2001
2. Glen Stuart Peace, "TAGUCHI METHODS," Addison Wesley, 1993
3. Salah Faik etc, "Modeling of Impact Dynamics", International ADAMS User Conference, 2000

4. 안길영 외, "규정된 동특성을 만족하기 위한 회로차단기의 최적설계" 대한기계학회 2001, 추계 학술대회논문집 A, PP. 859-864
5. 오덕수, "충격부하를 받는 휴대용 발사 구조물의 최적설계" 고려대학교 기계공학과, December 2001