

다구찌실험계획법을 활용한 기중차단기의 메커니즘 최적화

박우진*, 박용익*, 안길영*, 조해용**,#

* LS ELECTRIC(주) 전력연구소, ** 충북대학교 기계공학부

An Optimal Design of a Driving Mechanism for Air Circuit Breaker using Taguchi Design of Experiments

Woo-Jin Park*, Yong-ik Park*, Kil-Young Ahn*, Hae-Yong Cho**

*Electrotechnology R&D Center, LS ELECTRIC Co.,Ltd.,

**Department of Mechanical Eng. Chungbuk National University

(Received 18 July 2022; received in revised form 29 July 2022; accepted 03 August 2022)

ABSTRACT

An air circuit breaker (ACB) is an electrical protection device that interrupts abnormal fault currents that result from overloads or short circuits in a low-voltage power distribution line. The ACB consists of a main circuit part for current flow, mechanism part for the opening and closing operation of movable conductors, and arc-extinguishing part for arc extinction during the breaking operation. The driving mechanism of the ACB is a spring energy charging type. The faster the contact opening speed of the movable conductors during the opening process, the better the breaking performance. However, there is a disadvantage that the durability of mechanism decreases in inverse proportion to the use of a spring capable of accumulating high energy to configure the breaking speed faster. Therefore, to simultaneously satisfy the breaking performance and mechanical endurance of the ACB, its driving mechanism must be optimized. In this study, a dynamic model of the ACB was developed using the MDO(Mechanism Dynamics Option) module of CREO, which is widely used in multibody dynamics analysis. To improve the opening velocity, the Taguchi design method was applied to optimize the design parameters of an ACB with many linkages. In addition, to evaluate the improvement in the operating characteristics, the simulation and experimental results were compared with the MDO model and improved prototype sample, respectively.

Keywords : Optimization(최적화), Taguchi Method(다구찌기법), Air Circuit Breaker(기중회로차단기)

1. 서 론

기중 회로 차단기(ACB : Air Circuit Breaker)는 저압 배전계통 상단에 설치되어 필요에 따라 전력

의 공급, 절체 및 정지 등의 기능을 수행할 뿐 아니라 선로에 과전류 또는 단락사고와 같은 이상이 발생하였을 경우, 신속하게 전류를 차단하여 선로와 부하 측 설비를 안전하게 보호하는 장치이다. 기중 회로 차단기는 일반적으로 과전류 차단장치가 부착되어 있으며, 필요한 부하의 조건에 따라 조정이 가능하도록 되어있다.^[1]

Corresponding Author : hycho@chungbuk.ac.kr
Tel: +82-43-261-2464

기중 회로 차단기는 전류의 통전기능을 수행하기 위한 주회로부, 정격 전류의 개폐 및 과전류 또는 사고전류의 차단동작을 기구적으로 구현하기 위한 메커니즘부 그리고 차단 시 발생하는 아크를 신속하게 소호하기 위한 아크소호부로 구성된다. 일반적으로 차단기의 성능은 상기 세 가지 핵심 구성부의 복합적인 요소로 구현되며, 특히 안전하고 신뢰성 높은 메커니즘의 동작에 기반한다. 기중 회로 차단기는 통전을 위한 두 접점을 수십 ms내에 고속으로 투입(Closing) 또는 트립(Trip, Opening) 동작을 수행해야 하므로, 미리 인장 또는 압축되어 저장된 스프링 에너지에 의해 링크기구를 구동시키는 스프링 에너지 구동방식(Spring energy actuated) 메커니즘을 사용한다.^{[2],[4]} 그리고 스프링 에너지 구동방식 메커니즘을 통해 상대적으로 큰 질량을 가진 가동 접점부를 매우 짧은 시간(수십ms) 내에 빠른 속도로 동작시키게 된다. 따라서 메커니즘을 구성하는 다수의 링크들은 효율적인 동작을 위해 최적의 조건을 찾아 설계되어야 할 것이다. 이러한 최적 설계를 통해 제품의 차단 속도를 높여 궁극적으로 요구되는 차단 성능을 만족할 수 있게 된다.^{[5],[6]} Fig. 1은 본 연구의 대상제품인 기중 회로 차단기의 외관과 제품 내부에 구성되어있는 메커니즘 어셈블리를 나타낸다.

본 연구에서는 기중 회로 차단기의 동특성을 시뮬레이션 할 수 있는 다물체 동역학 모델(Multibody dynamics model)을 구성하여 실제 제품의 특성과 비교하였다. 또한 기중 회로 차단기의 동특성에 영

향을 미치는 인자와 수준을 선정하고, 다구찌 기법(Taguchi Method)을 이용하여 기중 회로 차단기의 개리시간 최소화를 위한 최적의 설계인자 조합을 제시하고자 한다.

2. 기중 회로 차단기의 동역학 모델 및 최적설계인자 선정

2.1 기중 회로 차단기의 동역학 모델

Fig. 2는 기중 회로 차단기의 주요 기구학적 요소를 이용하여 동작하는 메커니즘 구조를 단순화하여 나타낸 것이다. Fig. 2에서 기중 회로 차단기의 주요 기구학적 구조를 이용하여 개폐동작을 기술하면 다음과 같다. 먼저, 모터에 의한 캠의 회전에 주 스프링(Main spring)이 압축되면서 링크들을 가동시킬 수 있는 초기 상태가 된다. 다음으로 폐쇄 라치(Closing latch)를 해제하면 압축된 메인 스프링의 힘은 암(arm)을 상부로 운동시켜 암에 접촉하고 있는 롤러에 연결된 링크 a와 b를 일직선이 되도록 한다. 이때, 가동 접점은 고정 접점에 붙게 되고 접압스프링(Wipe spring)은 압축되어 접점을 가압하게 되어 투입 동작(Closing operation)이 완성된다. 투입완료 상태에서 트립 라치(Trip latch)를 해제하면, 링크 c가 회전하면서 기 압축된 접압스프링의 에너지 방출로 링크들을 운동시켜 가동접점을 고정 접점으로



Fig. 1 Exterior and operating mechanism of Air Circuit Breaker^[7]

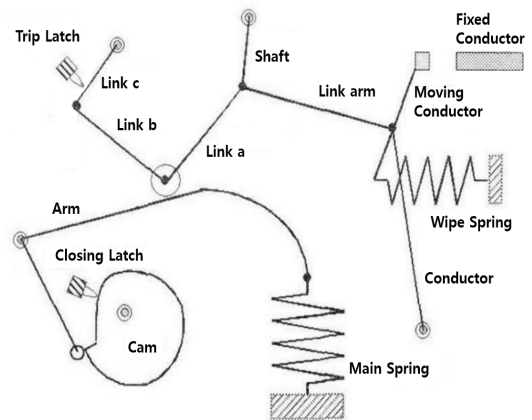


Fig. 2 Schematic diagram of operating mechanism of air circuit breaker^[8]

부터 분리시키면서 차단동작(opening operation)이 완성된다.^[8] 이처럼 기중 회로 차단기는 다양한 링크와 조인트들로 구성된 기구학적 체인구조로 동작하므로 차단기의 안정적인 동작을 위해서는 링크구조의 최적화를 통한 효율적인 메커니즘 설계가 필수적이다. 기중 회로 차단기의 사고전류 차단성능 구현을 위해서는 가동접점의 개리속도가 매우 중요하며, 개리속도가 빠를수록 안정적인 차단성능을 확보할 가능성이 높아지게 된다. 반면 차단속도를 빠르게 설계할수록 메커니즘의 링크들에 전달되는 하중이 커지게 되므로 내구수명이 감소하는 문제가 있으므로 링크구조의 최적화를 통해 개리시간을 최소화하는 것이 매우 중요하다. 기중 회로 차단기는 가동접점(Moving contact)과 고정접점(Fixed contact)의 접촉에 의해 통전 기능을 수행하며, 가동자(Moving conductor)는 차단기의 구동 메커니즘과 연동되어 개폐동작을 수행하게 된다.^[10] 구동 동작의 주 스프링인 압축스프링 에너지(차징완료상태의 P2하중)로 투입(Closing)동작이 진행되며, 투입동작의 완료와 함께 접압스프링(Wipe spring)이 압축되며 트립동작을 위한 에너지가 축적되어 트립라치의 해제 시 트립동작(Trip, Opening Operation)이 수행된다. 기중 회로 차단기의 메커니즘과 연동되는 주회로부의 동작을 시뮬레이션하기 위해 상용 동역학 해석프로그램인 Creo MDO 모듈을 이용하여 강체 다물체 동역학모델을 구성하였다.

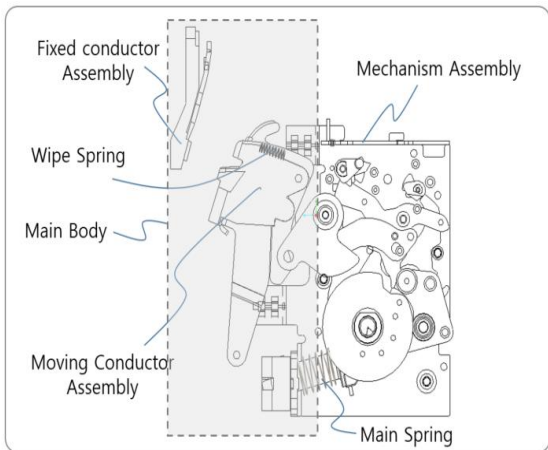


Fig. 3 Opened position of a driving mechanism

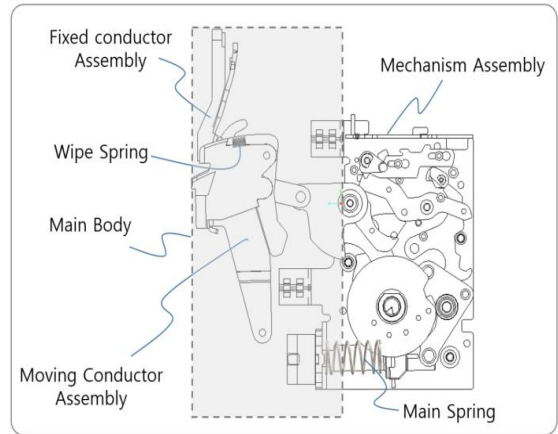


Fig. 4 Closed position of a driving mechanism

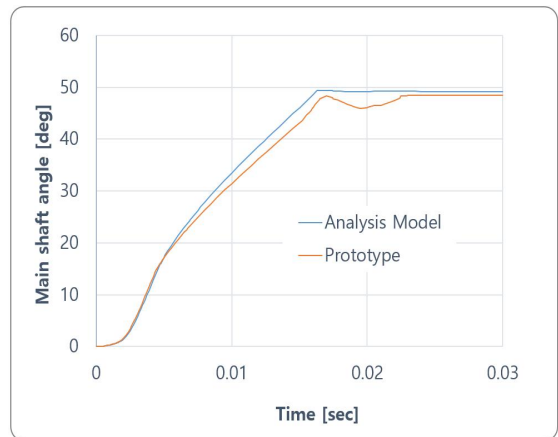


Fig. 5 Opening Characteristics of an air circuit breaker

Fig. 3은 동역학 해석모델에서 기중 회로 차단기의 트립상태(Tripped/Opened position)를 나타내며, 구동메커니즘의 투입완료 상태(Closed position)는 Fig. 4에 도시하였다. 동역학 모델에서 확인된 동작 특성 결과의 타당성을 검증하기 위하여 초기 차단기 설계안이 적용된 제품의 동특성 측정을 통해 차단 동작 시 동특성을 비교하였다. 차단동작 시 동특성 그래프를 Fig. 5에 나타내었으며, 가동자의 개리구간 동작에서 오차율 5% 수준으로 유사성을 가지는 것으로 분석되었다. 따라서 기중 회로 차단기의 차단 특성분석 시 본 연구에서 제안된 구동부 메커니즘의 동역학 모델 적용이 타당하다.

2.2 최적설계인자 선정 및 직교표 구성

기중 회로 차단기의 차단성능은 아크소호부의 구조, 사용되는 원재료의 소호특성 뿐만 아니라 가동부의 차단속도와 같은 기구적인 구동 메커니즘의 동작특성을 포함한 다양한 설계 요소가 복합적으로 작용하여 결정된다. 특히 구동 메커니즘의 동작과 연관된 설계요소는 가동부의 차단속도이며, 전체 개리구간에서의 차단속도와 함께 접점사이의 개리가 시작되는 초기 개리속도는 차단기의 성능을 좌우하는 중요한 요소라 할 수 있다. 차단기의 구동 메커니즘은 다양한 링크절들로 구성되어 서로 연계 동작하고 있으므로 효율적인 동작을 위한 주요 설계요소들의 최적화가 매우 중요하다. 가동부의 개리시간을 최소화하기 위해 선정된 주요 설계인자(A-H, 8개 인자)를 Table 1에 나타내었다.

구동 메커니즘의 차단동작과 시간에 영향을 주는 주요 링크들을 포함한 설계요소들의 설계변경이 가능한 범위를 검토하여 1개의 2수준 인자와 7개의 3수준 인자들로 나누어 설계인자를 정의하였다.

Table 1 Levels of design parameters

Par.	Description of Factor	Initial Design	Level 1	Level 2	Level 3
A	Free length of contact spring (La, mm)	23.2	23.10	23.20	-
B	Free length of open spring (Ls, mm)	50	50.00	51.00	52.00
C	Length of moving contact link(Lm, mm)	23.6	23.40	23.50	23.60
D	Length of main shaft link (Lh, mm)	30.5	30.50	30.60	30.70
E	Length of open spring link (Lo, mm)	18	17.00	17.50	18.00
F	Friction coefficient of Main shaft (F)	0.05	0.10	0.05	0.01
G	Mass of moving part (Mm, kgf)	2	1.90	2.00	2.10
H	Height of contact point (Hc, mm)	20	19.90	20.00	20.10

2.3 실험계획법을 통한 설계인자 분석

본 연구에서 선정된 기중 회로 차단기의 주요 설계인자들을 바탕으로 차단시간에 영향을 끼치는 인자들을 분석할 수 있다. 다구짜 기법에서 주요인자 분석은 데이터 결과들의 평균치의 제공으로 정의된 입력신호(Signal)와 데이터의 표준편차의 제공에 해당되는 잡음(Noise)의 분산의 비율인 신호대 잡음비(Signal to Noise ratio)를 기반으로 수행할 수 있다.

차단시간 관점에서는, 입력신호(설계인자 링크 길이)에 대한 잡음(S/N Ratio)의 변동이 최소화 되는 것이 최적조건이므로 목적함수는 식(1)과 같이 기대손실을 작게 하는 망소특성(The smaller the better characteristic) 관점으로 신호대 잡음비 함수를 구성하는 것이 필요하다.

$$f_{Optimal_1} = Min(S/N) = -10 \log \left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \right\} \quad (1)$$

차단속도 관점과 같이 최대화가 필요한 조건으로 진행할 경우에는 반대로 입력신호대미 잡음이 최대화 되어야 하므로 아래의 식 (2)와 같이 평균값이 크고 변동치가 작은 망대특성(The larger the better characteristic)으로 신호대 잡음비 함수를 적용할 수 있다.

$$f_{Optimal_2} = Max(S/N) = -10 \log \left\{ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{y_{ij}^2} \right\} \quad (2)$$

* y_{ij} : i번째 실험노드에서 관측된 j번째 성능 특성치

기중 회로 차단기의 차단 성능에 가장 영향을 크게 미치는 접점 개리 구간에서 차단기 구동메커니즘의 개리 시작시점이 빠르고 개리구간 동작시간이 작을수록 차단속도가 빨라지기 때문에 효과적인 차단성능 확보에 유리하다. 따라서 구동 메커니즘의 전체 개리시간을 최소화하기 위해 망소특성 함수인 식 (1)을 기반으로 항목별 신호대 잡음비(S/N비) 결과를 구하고 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

잡음비는 신호인자의 효과와 나머지 효과로 분해해서 두 효과의 비를 설계평가에 이용하기 위해 산출되었다. 산출된 잡음비를 통하여 각각의 설계인자들에 대한 기여율(Contribution Degree, CD)을 구할 수 있는데, 우선 각 인자수준별 잡음비의 합계와

Table 2 S/N Ratio Result in Orthogonal Table

Run	Parameters								Results	SN Ratio
	A	B	C	D	E	F	G	H		
1	23.10	50.00	23.40	30.50	17.00	0.10	1.90	19.90	1.684	-4.53
2	23.10	50.00	23.50	30.60	17.50	0.05	2.00	20.00	1.610	-4.13
3	23.10	50.00	23.60	30.70	18.00	0.01	2.10	20.10	1.479	-3.40
4	23.10	51.00	23.40	30.50	17.50	0.05	2.10	20.10	1.503	-3.54
5	23.10	51.00	23.50	30.60	18.00	0.01	1.90	19.90	1.476	-3.38
6	23.10	51.00	23.60	30.70	17.00	0.10	2.00	20.00	1.663	-4.42
7	23.10	52.00	23.40	30.60	17.00	0.01	2.00	20.10	1.434	-3.13
8	23.10	52.00	23.50	30.70	17.50	0.10	2.10	19.90	1.433	-3.13
9	23.10	52.00	23.60	30.50	18.00	0.05	1.90	20.00	1.398	-2.91
10	23.20	50.00	23.40	30.70	18.00	0.05	2.00	19.90	1.506	-3.56
11	23.20	50.00	23.50	30.50	17.00	0.01	2.10	20.00	1.763	-4.93
12	23.20	50.00	23.60	30.60	17.50	0.10	1.90	20.10	1.540	-3.75
13	23.20	51.00	23.40	30.60	18.00	0.10	2.10	20.00	1.501	-3.53
14	23.20	51.00	23.50	30.70	17.00	0.05	1.90	20.10	1.591	-4.03
15	23.20	51.00	23.60	30.50	17.50	0.01	2.00	19.90	1.631	-4.25
16	23.20	52.00	23.40	30.70	17.50	0.01	1.90	20.00	1.463	-3.31
17	23.20	52.00	23.50	30.50	18.00	0.10	2.00	20.10	1.479	-3.40
18	23.20	52.00	23.60	30.60	17.00	0.05	2.10	19.90	1.478	-3.39

평균값을 계산하고, 수준별 잡음비 평균값의 최대, 최소값의 차이를 이득(Gain, G)으로 정의한 후, 식 (3)와 같이 백분율로 유도할 수 있다^{[9]-[12]}.

$$CD = \left\{ G / \sum_{i=1}^n G \right\} \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

식 (3)를 기반으로 기증 회로 차단기의 주요구간 동작시간에 영향을 주는 설계인자들의 기여율 결과를 Table 3에 나타내었다. 기여율 결과 분석을 통해 잡음비의 최대값과 최소값의 간격이 크게 나타나는 설계요소 B와 E가 가장 효과적인 설계인자로 도출되었다. 차단기의 동작속도와 연계되는 스프링관련 링크요소와 부품들이 가장 효과적으로 결과 개선에 기여하기 때문이라 생각한다. 가동부의 개리시간을 최소화 할 수 있는 설계인자의 조합을 확인하기 위해서 각 설계인자별 신호대 잡음비 최대값을 나타내는 Level을 선정하여 선정된 설계인자들의 Level 값을 Table 1에서 나타내었던 초기설계 치수(Initial Design Value)값과 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

점점의 개리시간에 대한 S/N비는 B, E, D, H, C, F, A, G 순으로 그 기여도가 높게 나타나고 있는

Table 3 Contribution Degree for Min. Opening Time

		A	B	C	D	E	F	G	H
Sum of S/N ratio	Level 1	-32.6	-24.3	-21.6	-23.6	-24.4	-22.8	-21.9	-22.2
	Level 2	-34.1	-23.1	-23.0	-21.3	-22.1	-21.6	-22.9	-23.2
	Level 3		-19.3	-22.1	-21.8	-20.2	-22.4	-21.9	-21.3
S/N ratio, Level	Level 1	-3.6	-4.0	-3.6	-3.9	-4.1	-3.8	-3.7	-3.7
	Level 2	-3.8	-3.9	-3.8	-3.6	-3.7	-3.6	-3.8	-3.9
	Level 3		-3.2	-3.7	-3.6	-3.4	-3.7	-3.7	-3.5
S/N ratio	MAX	-3.6	-3.2	-3.6	-3.6	-3.4	-3.6	-3.7	-3.5
	MIN	-3.8	-4.0	-3.8	-3.9	-4.1	-3.8	-3.8	-3.9
Max - Min	Gain	0.18	0.84	0.24	0.37	0.71	0.20	0.16	0.33
Contrib. Degree		6.5%	31.2%	8.8%	13.8%	26.3%	7.3%	6.0%	12.2%

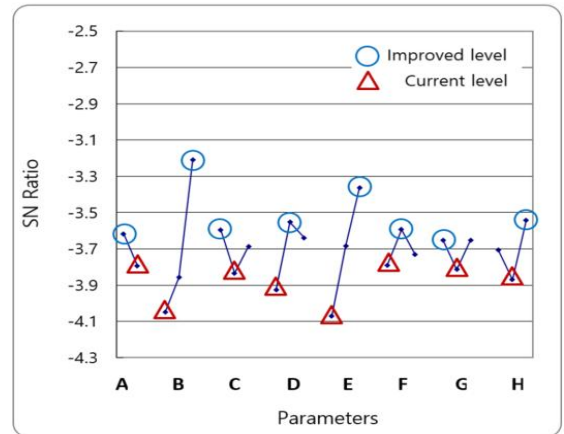


Fig. 6 S/N ratio diagram of each parameter

것을 알 수 있다. 따라서 최적 설계 조합은 A의 1수준, B의 3수준, C의 1수준, D의 2수준, E의 3수준, F의 2수준, G의 1수준, H의 3수준으로 나타났다. 이때 유의미한 기여도 상위 항목들에 대해 개리시간의 평균값으로 식(4)를 사용하여 수준별 평균값을 통하여 감도(S)를 확인하고 Table 4에 나타내었다.^{[11][12]}

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (4)$$

Table 4 Response Table for Means of Opening time

Factor		B	C	D	E	H
Means	1	1.597	1.515	1.576	1.602	1.535
	2	1.561	1.559	1.506	1.53	1.566
	3	1.447	1.532	1.523	1.473	1.501
delta		0.15	0.044	0.07	0.129	0.065
Rank		1	5	3	2	4

기중 회로 차단기의 개리시간 최소화를 위한 다구찌 실험계획법 활용을 통해 구동 메카니즘 주요 설계인자들의 최적조합구성안을 도출하였으며, 이러한 결과는 차단기 개리 시간 감소에 기여하고 있으므로 최적 설계안으로 제시하는 것이 바람직하다.

3. 실험결과 및 고찰

실험계획법을 통해 도출한 최적설계안의 차단속도 개선효과를 확인하기 위하여 시제품을 제작하고, 개선 전 후 동특성을 측정하여 Fig. 7에 나타내었다. 초기 모델 대비 구동 메카니즘 최적 설계안의 초기 개리 시작시간(Δt_{start})이 단축되었을 뿐 아니라, 차단 주요 구간의 개리시간도 약 24% 단축(Δt_{opened})되었다.

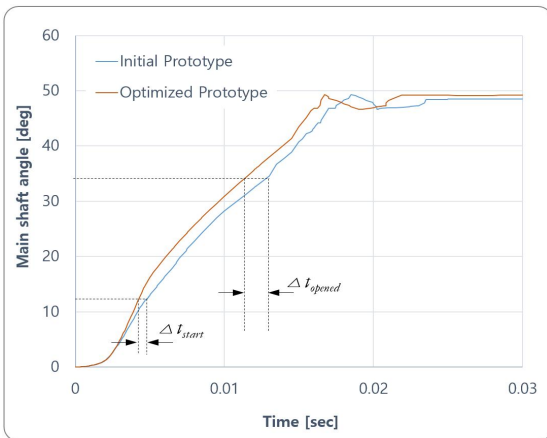


Fig. 7 Comparison of opening time

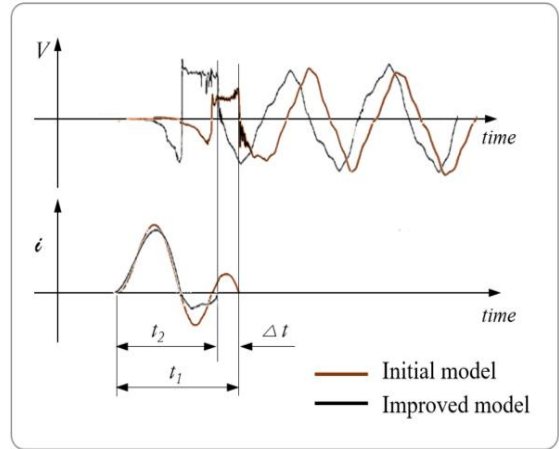


Fig. 8 Fault current breaking time results

다구찌 실험계획법을 통해 도출한 최적 설계안의 적용이 개리시작 시점을 앞당기고 개리 구간에서의 동작 시간 단축에 기여하고 있는 것으로 판단된다. 따라서 제시된 최적 설계안의 적용이 차단 성능 개선에 긍정적 효과를 나타낼 것으로 예상된다.

Fig. 8은 시제품의 대전력 차단시험파형을 나타낸 것이며, 구동 메카니즘의 최적 설계안이 적용된 개선 시제품의 사고전류 차단시간이 t_1 에서 t_2 로 약 13% 감소하였다. 따라서 실험계획법을 통해 제안된 최적설계안 적용으로 개선된 동특성을 가지는 기중 회로 차단기는 단순히 구동 메카니즘과 연계한 가동부의 개리시간 단축 뿐 아니라 대전류(사고전류) 차단시험 시에도 차단시간이 단축되었다. 이러한 결과로부터 기중 차단기 내부에 발생하는 아크에너지를 감소시켜 궁극적으로는 차단성능 향상에도 기여할 것으로 예상된다.

4. 결론

본 논문에서는 기중 회로 차단기의 구동 메카니즘 차단시간 최적화를 위해 동역학 해석모델과 다구찌 실험계획법을 활용하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기중 회로 차단기의 동작 시뮬레이션을 위해 동역학해석프로그램(Creo MDO)을 이용하여 강체 다물체 동역학모델을 구성하였으며, 동특성 비교

결과 오차율 5% 수준으로 유사성을 가지므로 특성분석 시 동역학 모델의 적용이 타당하다.

2. 다구찌 실험계획법을 이용하여 도출된 핵심인자들의 조합구성을 차단기 개리 시간 최소화를 위한 최적 설계안으로 제시하는 것이 바람직하다.
3. 도출된 최적설계안을 적용한 시제품의 동특성을 확인한 결과, 차단기의 개리시간이 약 24% 개선 되었으므로 실험계획법을 통해 제시된 최적설계안의 적용이 효과적일 것으로 예상된다.
4. 최적설계안 적용으로 개선된 동특성을 가지는 기증 회로 차단기는 단순히 구동 메커니즘의 개리시간 단축 뿐 아니라 대전류 차단시험 시 차단 시간 단축(13%수준)이 확인되었으므로 차단기 내부에 발생하는 아크에너지를 감소시켜 궁극적으로 차단성능 향상에도 기여할 것이다.

본 논문을 통해 저압 기증 회로 차단기의 차단 성능 개선을 위해 구동메커니즘의 동역학 해석모델과 다구찌 실험계획법 적용을 통한 메커니즘 최적화 방법을 제시하였으며, 본 연구내용은 향후 차단 동작 시간 단축 뿐 아니라 투입 동작의 효율 최적화에도 활용되어 기증 회로 차단기의 동작 신뢰성을 높이는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

1. Park, S. H., Lee, B. Y., Kim, W. J., Ahn, K. Y., Oh, I. S., "Improvement on the Fatigue-proof Characteristics of the Link Member Under an Impact Loadings in a Spring-Actuated Mechanism," Journal of the Korean Society of Atomotive Engineers, 02-0009, pp. 19-25, 2002.
2. Flurschein, C. H., "Power Cirecuit Breaker Theory and Design," Short Run Press Ltd., pp. 68-127, 1975.
3. Van Sickle, R. C. and Goodman, T. P., "Spring Actuated Linkage Analysis to Increase Speed," Product Engineering, Vol. 24, pp. 152-157, 1953.
4. Barkan, P., "Dynamics of High-Capacity Outdoor Oil Circuit Breaker," AIEE Transactios, Vol. 74, Part III, pp. 671-676, 1955.
5. International Electrotechnical Commission. IEC 60947-2; Low-voltage switchgear and controlgear. Part 2; Circuit Breakers, pp.256, 2016
6. International Electrotechnical Commission. IEC 60947-3; Low-voltage switchgear and controlgear. Part 3; Switches, disconnectors, switch-disconnectors and fuse-combination units, pp. 61, 2008/ADM2:2015
7. Susol Air Circuit Breaker Catalogue, LS ELECTRIC; Structure of ACB, pp17, 2011.
8. Ahn, K. Y., Park, S. H., Lee, B. Y., Oh, I. S., "Improvement on the Fatigue-proof Characteristics of Link Members Under an Impact Loadings by a Spring-Actuated Mechanism," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 20, No. 4, pp. 158-164, 2003.
9. Cho, J. Y., Ahn, K. Y., Kim, S. T., Yang, H. I. and Kim, K. J., "Dynamic Responses Optimization of Vacuum Circuit Breaker Using Taguchi Method," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 141-148, 2015
10. Root, R. R., "The Circuit Breaker-A Practical Example in Engineering Optimization," Mechanism and Machine Theory, Vol. 18, No. 3, pp. 229-235, 1983
11. Cheon, K. M., An, J. H., Hur, J. W., "Design of Gaskets for Hydrogen Fuel Cells Using Taguchi Method," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 21, No. 1, pp. 66-72, 2022
12. Lim, Y. B., "Selection of Signal-to-Noise Ratio through Simple Data Analysis," Journal of the Korean Society of Quality Management, Vol. 22, No. 4, pp. 1-12, 1994.