

Study on the Performance Verification Method and Failure Mechanism of Grading Capacitor of a Two-break Circuit-breaker

2점절 차단기 균압용 콘덴서 절연파괴 고장 메커니즘 및 성능검증 방법에 관한 연구

SeungRyle Oh^{1†}, Kisun Han¹, TaeKyun Kim¹
오승열^{1†}, 한기선¹, 김태균¹

Abstract

Recently, the circuit-breaker rated voltage is getting higher as the transmission voltage increases. To increase the circuit-breaker rated voltage, a multi-break circuit-breaker which has two or more breakers in series is adopted. For multi-break circuit-breaker, a grading capacitor is used to mitigate the Transient Recovery Voltage(TRV) and control the voltage distribution across the individual interrupter units. However, all over the world, there are many failures such as mechanical damage, explosion due to insulation breakdown. Therefore, it is necessary to study the causes of failure and the new performance verification method. In this paper, we investigate the causes of dielectric breakdown of the grading capacitors in the KEPCO power system and propose the performance verification method.

최근 송전전압 격상으로 인해 차단기 또한 정격이 높아지고 있다. 이에 차단부의 전압 정격을 높이기 위한 방법으로 차단부 2개 이상을 직렬로 구성하는 다점절 차단기가 설치되어 운용되고 있다. 다점절 차단기에서 차단부 극간에 설치되는 균압용 콘덴서는 점절간 균등한 전압분배와 초기 과도회복전압을 저감하는 기능을 수행한다. 하지만, 세계적으로 실계통 사용에서 균압용 콘덴서는 기계적인 손상, 절연파괴에 의한 폭발 등 다수의 고장이 발생하고 있어, 이에 대한 원인 규명과 새로운 성능 검증방법에 대한 연구 필요성이 제기 되고 있다. 본 논문에서는 한전 계통에서 주로 발생한 균압용 콘덴서의 절연파괴 원인을 규명하고 이에 대한 제품 성능검증 방법을 제안하고자 한다.

Keywords: Grading capacitor, Multi-break circuit-breaker, Transient Recovery Voltage, TRV

I. 서론

A. 연구 배경

우리나라를 비롯한 각국의 송전전압 격상으로 인해 전력설비의 정격전압 또한 높아지고 있다. 부하전류의 안정적인 통전과 고장전류 차단을 위해 사용되는 SF6 가스차단기는 550 kV 전압 수준까지는 차단부가 하나로 구성되는 단점절 차단기가 개발 되었으나, 그 이상의 전압 계통에서는 2

개 이상의 차단부를 직렬로 연결하여 정격전압을 높이는 방식의 다점절 차단기가 운용되고 있다.

다점절 차단기는 점절간 균등한 전압분배 및 과도회복 전압의 경감을 위해 균압용 콘덴서가 필수로 사용되고 있다. 하지만 세계적으로 균압용 콘덴서의 기계적인 손상, 절연파괴에 의한 폭발 등의 고장이 다수 발생하고 있어, 이에 대한 원인 규명과 더불어 새로운 성능 검증방법에 대한 연구 필요성이 제기 되고 있다 [1]. 우리나라 계통에서도 362 kV

Manuscript received September 3, 2018, Accepted December 16, 2018

¹ KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Korea

† exp0510@kepco.co.kr

This paper is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>. This paper and/or Supplementary information is available at <http://journal.kepco.co.kr>.

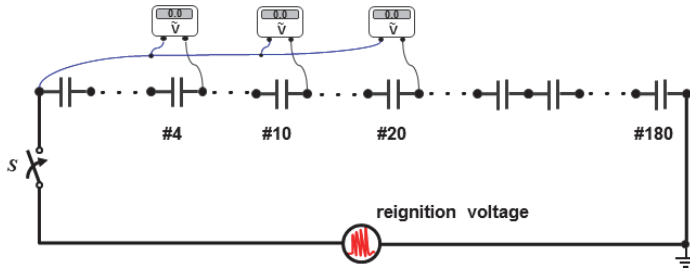


Fig. 1. 재발호 전압의 셀간 불균등 분배 검증.



Fig. 2. 재단파 전압에 대한 콘덴서 셀 절연열화 검증.

급 가스차단기에서 2010년 이후 6건 이상의 고장이 발생 하였으나, 정확한 원인이 규명되지 않고 있다. 따라서 향후 유사 고장 방지를 위해 정확한 원인에 따른 고장 메커니즘을 분석하고 신뢰성 있는 제품 성능검증 방법이 필요하다.

B. 해외 고장사례 분석

해외에서의 균압용 콘덴서의 고장은 기계적인 원인보다는 전기적인 스트레스로 인한 고장이 많았으며, 주로 개폐 빈도가 높거나 써지가 많은 분리리액터와 변압기 개폐용으로 사용된 차단기에서 발생하였다. 이에 대한 원인규명을 위해 재발호 전압에 대한 콘덴서 셀간 전압 불균등 분배 여부를 검증하였으나 원인으로 특정할 만한 결과는 도출 되지 않았다 [2][3].

또한, 위 시험에 사용된 콘덴서 중 6개를 발취하여 정극성, 부극성 재단파 전압을 25회씩 인가 한 후 콘덴서의 절연열화 정도를 판단하기 위해 부분방전 및 내전압 시험을 진행하였으나, 이로 인한 절연열화의 징후는 발견되지 않았다.

II. 고장원인 분석

A. 균압용 콘덴서 정격검토

362 kV 2점절 차단기 균압용 콘덴서의 셀 조합과 정격 전압은 제작사 별로 상이하며 AC내전압은 B사 제품에 비해 A사 50 kA 제품은 62% 수준 이므로, 상대적으로 낮은 정격이 고장의 원인이 될 수 있는지 검토가 필요하다. 아래 표는 동일정격(362 kV, 4,000 A, 2점절)에 대한 각 제작사별 균압용 콘덴서 값을 비교한 것이다.

Table 1. 차단기 균압콘덴서 비교(제작사 제시값)

비교항목	A사		B사	C사
	40 kA	50 kA	(40/50 kA)	(40 kA)
C/셀 [pF]	1 650	2 900	1 700	750
직렬 조합수	17	17	22	11
병렬 조합수	4	8	5	10
정격전압/셀	10	8	10	16.5
C/점절당 [pF]	388	1,365	386	682
AC 점절당[kV]	595	476	770	-
내전압 상대비교	77%	62%	100%	-

Table 2. 차단기(362 kV, 4,000 A, 2점절) 제작사별 비교

비교항목	A사 (50 kA)	B사 (40/50 kA)	C사 (40 kA)
인정시험 수행기간	'03.4~'04.1	'03.6~'04.1	'99.9~'00.4
조작방식	공압	공압	유압
개극시간	27.3 ms	22.1 ms	27.5 ms
개극 시간차	1 ms 이하	1 ms 이하	-
지상소전류	half pole 시험	half pole 시험	full pole 시험

Table 3. 분리리액터 모델링

정격전압(U_r)	용량(S)	커패시턴스(C_s)	손실(P_{loss})
345 kV	200 Mvar	10,526 pF	481 kW

B. 균압용 콘덴서 절연열화 확인 시험

2011년 345 kV 미금변전소에서 2점절 차단기에 대한 고장 발생 당시 균압용 콘덴서에 사용되는 단위 콘덴서 셀을 대상으로 신제품과 6년 동안 300회 전후의 동작을 수행한 고장 차단기의 균압용 콘덴서에 대한 시험을 통해 절연파괴 전압을 비교한 결과 평균 25% 최대 40% 저하된 것을 시험을 통해 확인 하였다.

당시 고장원인으로는 콘덴서의 절연열화가 차단기 고장으로 파급되었다는 추정을 하였으나, 결국 이러한 콘덴서 절연열화의 직접적인 원인 규명까지는 이르지 못했으므로 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

C. 가스절연개폐장치(GIS) 인정시험 검토

제작사별로 GIS에 대한 인정시험은 2000년 전후로 이루어 졌으며, 당시에는 균압용 콘덴서에 대한 규격은 제정 되지 않았다. 2013년 균압용 콘덴서에 대한 IEC 국제규격이 제정되었으므로 향후, 한전표준규격 개정을 통해 균압용 콘덴서의 성능에 대한 별도의 검증이 필요하다고 판단된다.

2점절 차단기에서 점절간 개극 시간차는 극간 차단 시간차이로 이어져 점절간 회복전압 불균등 분배를 초래 할 수 있다. 인정시험시 C사 제품을 제외한 A사, B사 제품은 하나의 극에 대해서만 시험하여, 전압 불균등 분배에 대한 검증이 이루어지지 않았다.

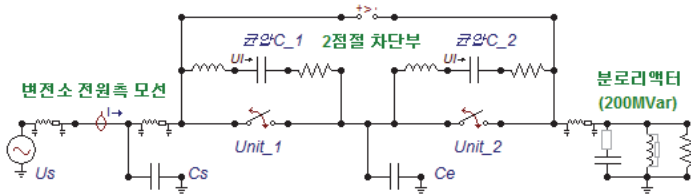


Fig. 3. EMTP 해석을 위한 모델링(Sh.R 차단 모의).

한전표준규격에 의한 상용주파 내전압 및 임펄스 내전압 시험은 차단기 개방 상태에서 이루어지므로, 점절간 차단 시간차에 의한 스트레스 편중 현상은 나타나지 않는다. 실제 3개사에서 이루어진 GIS 인정시험에서는 하나의 점절에 대해서만 시험(half pole test)이 이루어지거나, 일부 점절에 대한 시험(full pole test)이 수행 되었으나, 각 점절간 분담되는 전압은 측정되지 않아 인가되는 스트레스를 파악하기는 어렵다. 따라서 차단기 무부하 동작특성 시험에서 나타난 바와 같이, 점절간 개극 시간차(1 ms)에 의한 균압용 콘덴서 전압분담에 대해서 EMTP(전자계과도해석 프로그램)를 통한 모델링 및 해석을 통해 추가 확인이 필요하다.

D. EMTP 모델링 및 해석 결과

점절간 차단 시간차에 의한 전압 불균등 분담을 확인하기 위해 무부하 송전 선로, 단락전류 및 분로리액터 차단시 균압용 콘덴서의 전압을 분석하였다. 해석을 위한 EMTP 모델링을 위해 각 사별 균압용 콘덴서 값을 활용하여 2점절 차단기를 모델링 하였으며 차단기 2차측 부하는 해석 조건에 따라 단락조건 및 무부하 충전선로, 분로리액터로 구성된다.

분로리액터 모델링분로리액터의 리액턴스는 아래 식에 의해 1,578 mH로 모델링 하였다.

$$S = \sqrt{3}U_r I_{sh}$$

$$L = \frac{U_r^2}{\omega S}$$
(1)

여기에서 I_{sh} : 부하전류

1) 무부하 송전선로 차단시 균압용 콘덴서 전압분담

1 ms의 차단 시간차를 기준으로 제작사별 GIS 균압콘덴서 용량에 대해 모의 하여 해석한 결과 과도회복전압(TRV) 피크값(U_c)은 큰 차이를 보이지 않았다.

차단 시간차에 의한 균압용 콘덴서의 회복전압 분담 피크값은 A사(311 kV), B사(330 kV), C사(320 kV)로 나타났으며, 이는 균압용 콘덴서의 정격보다 작은 값이지만, 300 kV가 넘는 상용주파전압이 극간에 인가되므로 차단기가 수 분 이상 개방 상태를 유지할 경우 콘덴서에는 상당한 스트레스로 작용할 수 있다.

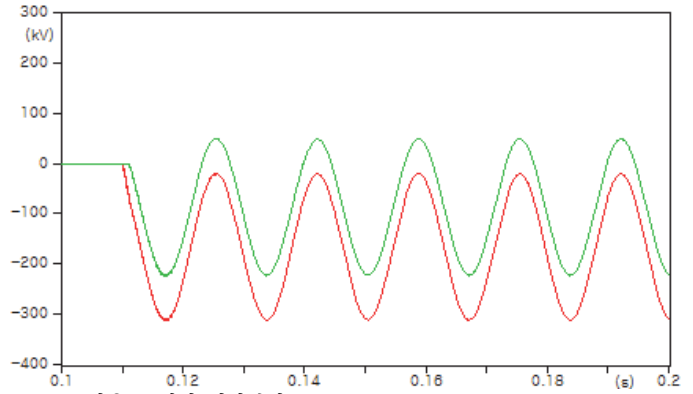


Fig. 4. 균압용 콘덴서 전압분담.

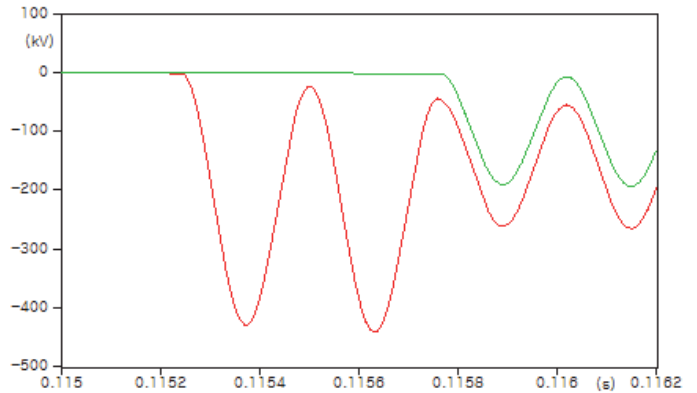


Fig. 5. 균압용 콘덴서 전압분담.

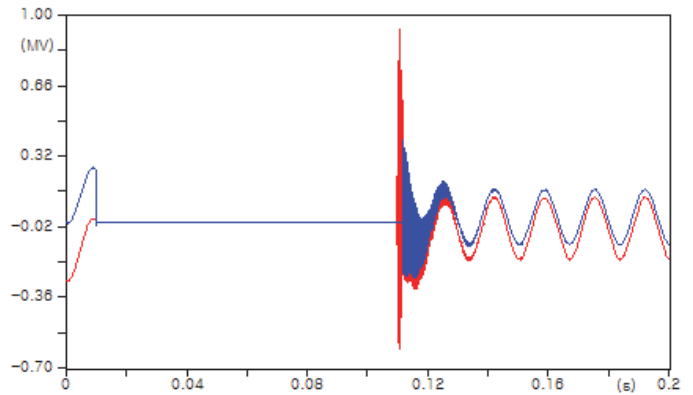


Fig. 6. 균압용 콘덴서 전압분담.

2) 단락전류 차단시 균압용 콘덴서 전압분담

고장전류를 차단하는 과정에서 점절간 차단 시간차는 균압용 콘덴서에 전압이 불균등 분배된다. 50 kA 정격단락 차단전류의 30%인 15 kA 수준의 고장전류를 차단 할 경우, 전압 불균등 분배에 의해 균압용 콘덴서에 인가되는 전압은 428 kV 수준으로 인정시험에서 점절당 인가되는 개폐과전압인 548 kV 보다는 낮은 수준이어서 콘덴서의 절연열화에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

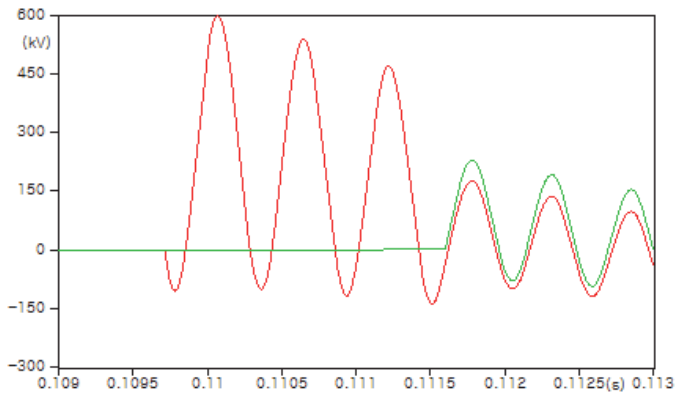


Fig. 7. 차단 시간차 1 ms, 재발호가 없는 경우 전압분담.

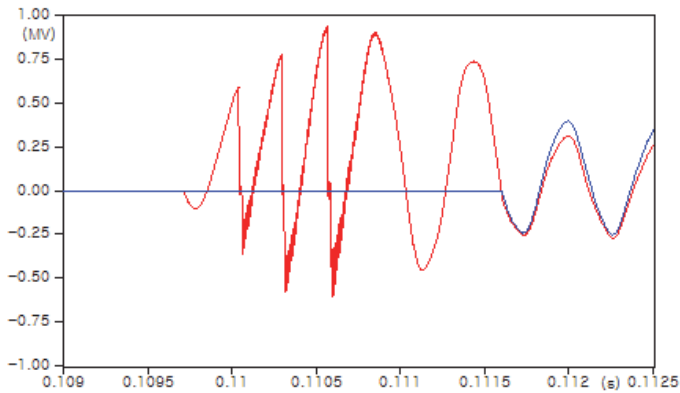


Fig. 8. 차단 시간차 1 ms, 재발호 3회 발생 경우 전압분담.

3) 분로리액터(Sh.R) 차단시 균압용 콘덴서 전압분담

초고압 차단기의 소전류 재단 레벨인 5 A에서 1 ms의 차단 시간차가 있을 경우 재발호 유무에 따른 과전압을 분석하였다. 재발호가 없는 경우에도 피크값은 600 kV 수준으로 점절당 인가되는 개폐충격 내전압인 548 kV 보다 높은 수준으로 나타났으며, 개폐 횟수가 누적 될 경우 고장으로 파급 될 수 있다.

재발호가 발생하는 경우 과전압 스트레스는 더욱 커져, 3회의 재발호가 발생할 경우 914 kV 수준의 높은 전압이 균압용 콘덴서에 인가 될 수 있어 작은 개폐 횟수에도 콘덴서의 고장을 유발 시킬 수 있다.

내전압 정격을 비교해 볼 때, 고장이 발생 하였던 A사 50 kA 차단기의 경우 균압용 콘덴서의 정격 여유율이 낮아 동작횟수가 누적되면 절연열화로 인해 고장으로 파급 될 수 있는 가능성이 동일사 40 kA 차단기에 비해 크다고 볼 수 있다.

III. 결론

2011년에 수행한 균압용 콘덴서 셀에 대한 절연열화 비교 시험 및 EMTF 해석 결과를 근거로, 차단기의 고장원

Table 4. 균압콘덴서 전압분담 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 조건 (1 ms 차단 시간차 기준)		점절당 분담전압 [kVp]
1) 무부하 송전선로 차단시		311 ~ 330
2) 단락전류 차단시 (T30기준)		428
3) 분로리액터 (Sh.R) 차단시	재발호 0회 기준	600
	재발호 3회 기준	914

Table 5. 점절당 최대 인가전압 대비 정격여유율 검토

균압콘덴서 정격		시뮬레이션 결과		
구분		(a) 정격전압 [kV]	(b) 극간전압 [kV]	정격여유 (a)/(b)
362 kV GIS	40 kA	595	311	1.91
	50 kA	476		1.53

인은 점절간 차단 시간차에 의해 전압불균등 분배가 이루어지며, 최초 계통 설치 후 운전시간 및 전압스트레스 누적에 의해 콘덴서의 절연열화가 진행되며, 이로 인해 콘덴서의 절연내력을 초과하는 전압스트레스가 인가되어 절연파괴 고장으로 파급 된 것으로 추정할 수 있다. 따라서 향후 362 kV, 50 kA, 2점절 차단기의 경우 내전압 정격이 높은 균압용 콘덴서로 교체가 필요하며, 신설 차단기에 대해서는 1점절 차단기를 적용할 것을 제안한다. 그러나, 800 kV급과 같이 현재 제작사의 기술적 제약으로 인해 2점절 차단기를 적용해야 하는 경우, 점절간 차단 시간차 및 사용중 절연내력 저하를 고려하여 90% 이상 여유율을 갖는 정격의 콘덴서 사용이 필요하다. 또한 차단기를 제작할 경우 균압용 콘덴서에 대해서는 관련규격인 IEC 62146-1에 근거 하여 성능이 기 확보된 제품을 사용하는 것이 필요하다.

특히 관련 IEC 규격에 의한 개발시험(type test)과 한전 표준규격에 의한 인정시험시 단락전류차단 시험, 진상소전류 시험, 지상소전류 시험 등을 수행함에 있어 하나의 차단부에 대해서만 시험을 수행하는 half pole 시험의 경우 아크 및 절연 등 차단기 내부에 가해지는 스트레스에 대한 올바른 검증이 이루어 질수 없으며, 특히 점절간 차단시간차에 의한 균압용 콘덴서의 스트레스 편중에 따른 성능 검증이 어려우므로, 향후에는 시험소 용량 제약이 없을 경우 half pole 시험 대신 full pole 시험으로 검증할 것을 제안한다.

REFERENCES

[1] CIGRE Working Group A3.18, "Operating Environment of Voltage Grading Capacitors Applied to High Voltage Circuit-breakers", 2009.
 [2] M. RUNDE, A. BOSMA, P. COVENTRY, S. DICK, P. GRAMAGLIA, H. JAHN, N. KOCH, E. KYNAST, M. PREDOVAN, A. RIBEIRO, E. SAVARY, B. R. SUNGA, D. YOSHIDA, J. SKJOLBERG "Service Experience with Voltage Grading Capacitors", 2006.

- [3] M. RUNDE, J. SLETBAK, J.-T. ERSDAL, SINTEF, A. MJELVE B. SKYBERG L. SOREIDE E. ÅKRA, "Failures of Voltage Grading Capacitors in GIS Circuit-breakers," 2004.
- [4] IEC 62146-1: 2013 "Grading capacitors for high-voltage alternating current circuit-breakers –Part 1: General."
- [5] "Final Report of the 2004 - 2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment," CIGRE Working Group A3.06, 2012.
- [6] CIGRE Working Group A3.22, "Background of Technical Specifications for Substation Equipment exceeding 800 kV AC," 2011.
- [7] IEC 62271-100: 2008 "High-voltage switchgear and controlgear –Part 100: Alternating-current circuit-breakers."