

SF₆ 가스차단기에서 가스 속도측정을 위한 Small-Gap 측정시스템에 관한 연구

論 文
54B-3-5

Study on The Small-Gap Measuring System for Gas Velocity Measurement of SF₆ Gas Circuit Breaker

鄭 鎭 敎[†] · 金 烘 樞^{*} · 宋 基 東^{**} · 李 佑 暎^{**} · 朴 敬 燁^{***}
(Jin-Kyo Chong · Hong-Kyu Kim · Woo-Young Lee · Kyong-Yop Park)

Abstract - SF₆ gas circuit breakers are widely used short circuit current interruption in EHV or UHV power system. For a SF₆ gas circuit breaker development, the SF₆ gas velocity measurement is necessary during SF₆ circuit breaker's trip operation. Small-gap flashover characteristics are used for this measurement. So, small-gap measuring system which will be used to develop GCB should be developed.

This study shows the characteristic analysis and experimental results of small-gap measuring system.

Key Words : SF₆ 가스차단기, Small-Gap 방전특성, 속도측정

1. 서 론

초고압 전력계통에서 고장이 발생하는 경우, 고장전류를 차단하기 위하여 SF₆ 가스차단기가 일반적으로 사용된다. SF₆ 가스차단기는 트립동작을 수행하는 동안에 파퍼실린더와 피스톤의 상호작용에 의하여 SF₆ 가스를 압축하게 되고 이 압축된 SF₆ 가스를 절연노즐을 통하여 아크점점 사이에서 발생한 아크에 분사하여 아크를 소호하는 구조를 가진다. 아크가 소호되면 차단기의 두 아크점점사이에 과도회복전압(Transient Recovery Voltage)이 인가되는데 재점화 과정없이 이 과도회복 전압을 견디어 내면 가스차단기는 비로소 고장전류의 차단에 성공하게 된다. 따라서 SF₆ 가스차단기를 개발하기 위해서는 전기적인 아크에 의하여 고온으로 가열된 SF₆ 열가스가 존재하는 소호부(노즐과 가동 및 고정아크점점 부위)에 압축된 SF₆ 가스를 배출하여 열가스를 냉각시킴으로써 고장전류가 소호된 후, 아크점점 사이의 절연성능을 빠르게 회복시키는 것이 매우 중요하다.

SF₆ 가스차단기의 차단성능을 평가하기 위해서는 차단기의 트립동작과 함께 차단기 내부에서 시간에 따라 변화하는 유동 파라미터(압력, 밀도, 온도, 속도 등)의 값을 정확하게 분석하는 것이 매우 중요하며, 특히 차단부 내부에서 발생하는 SF₆ 가스의 이동 속도에 대한 분석은 필수적이다. 차단기에 전류가 공급되지 않는 무부하 조건에서는 SF₆ 가스의 온도가 높지 않으므로 수치해석의 결과와 실험결과를 비교하는 데는 큰 문제가 없지만, 고장전류가 공급되는 유부하

조건에서는 아크영역의 SF₆ 가스분자가 해리되면서 SF₆ 가스의 고유특성을 상실하게 되므로 수치해석을 수행하여 정확한 해를 구하는 것이 매우 어렵게 된다. 그러므로 무부하 혹은 유부하 조건에서 SF₆ 가스의 이동속도를 측정하여 수치해석에 의하여 계산된 해석결과와 상호 비교함으로써 해석결과에 대한 타당성을 검증할 필요가 있다. 차단기가 트립동작을 수행하는 동안에 차단부에서 발생하는 SF₆ 가스의 이동 속도는 차단기 안에 다수의 small-gap을 설치한 후 각각의 small-gap에서 발생하는 방전 전압의 특성을 분석함으로써 추정이 가능하다. 이를 위해서는 SF₆ 가스의 이동속도를 측정하기 이전에 SF₆ 가스의 압력 및 밀도조건에 따른 small-gap의 방전전압에 대한 특성을 확보하고 있어야 한다^[1].

본 논문에서는 차단기가 동작하는 동안 차단부에서 발생하는 SF₆ 가스의 이동속도를 측정하기 위하여 차단기 내부에 설치 가능한 한 쌍의 침전극으로 구성되는 small-gap의 구조, 충방전 시간이 1ms이하인 전원장치로 구성되는 small-gap 방전전압 측정시스템(이하 small-gap 측정시스템)의 설계 및 제작에 대한 연구내용을 정리하였으며, small-gap을 구성하는 침전극의 거리 및 상온의 SF₆ 가스 압력조건에 따른 small-gap에서의 방전전압에 대한 측정결과를 정리하였다.

2. Small-gap 측정시스템

2.1 Small-gap에서의 전계해석

주어진 SF₆ 가스의 압력조건과 전극 사이의 거리에 따른 방전전압을 알고 있어야 small-gap 측정시스템의 회로소자에 대한 용량 및 내압정격을 결정하는 것이 가능해진다. 그러므로 small-gap의 전극의 형상 및 전극 사이의 거리에 대한 방전전압을 알기 위하여 small-gap에 대한 전계해석을

[†] 교신저자, 正 會 員 : 韓國電氣研究院 先任研究員

E-mail : jkchong@keri.re.kr

^{*} 正 會 員 : 韓國電氣研究院 先任研究員

^{**} 正 會 員 : 韓國電氣研究院 責任研究員

^{***} 正 會 員 : 韓國電氣研究院 責任先究員 Group長

接受日字 : 2004年 10月 20日

最終完了 : 2005年 1月 12日

수행하였다. small-gap은 전극사이의 길이가 0.5mm이고 전극의 반지름이 0.5mm인 침전극을 이용하여 구성하였다. 그림 1은 전계해석을 위한 small-gap의 형상을 보여주고 있다.

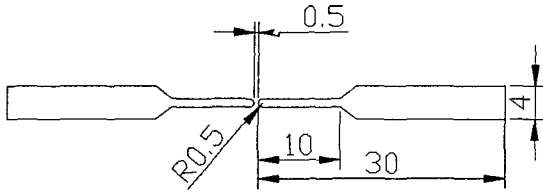


그림 1 전계해석을 위한 해석형상
Fig. 1 Configuration for electric field analysis

전계해석을 위한 경계조건으로는 고압부에 1V, 저압부에 0V를 인가하였으며 해석영역의 매질조건은 SF₆ 가스의 비유전율 1을 대입하여 계산을 수행하였으며, 침전극이 이상적으로 정렬되었다고 가정하고 축대칭 정전장 해석을 수행하였다. 전계해석은 Magsoft사의 Flux2D Ver 7.5 프로그램을 이용하였다. 그림 2는 전극표면에서의 전계강도의 세기를 보여주고 있으며 최대전계의 세기는 3V/mm의 값을 가지는 것을 알 수 있다.

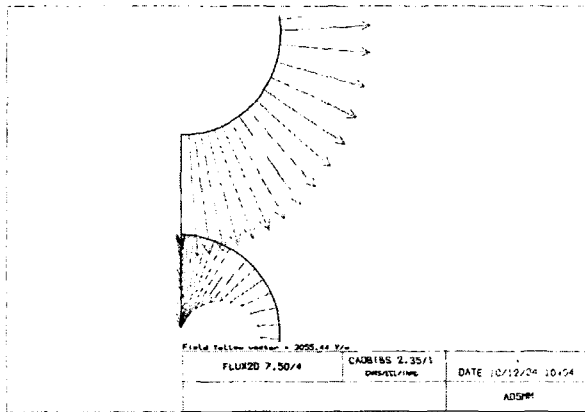


그림 2 small-gap에 대한 해석결과
Fig. 2 Calculation result of small-gap

상온에서 SF₆ 가스의 압력에 따른 전계강도의 세기는 압력에 비례하며 압력에 따른 임계전계강도의 세기 및 밀도조건을 정리하면 그림 3과 같다^[2,3].

일반적으로 초고압 SF₆ 가스차단기에서 사용하는 SF₆ 가스의 충전 압력은 6[kgf/cm².abs]이다. 그러므로 그림 3으로부터 SF₆ 가스의 압력이 6[kgf/cm².abs]일 때 전계강도가 51.3kV/mm가 되면 전극 간에 절연파괴가 발생한다는 알 수 있다. 그림 2의 해석결과로부터 small-gap에서 전계강도 51.3kV/mm를 발생시키기 위한 전압의 크기는 17kV가 되는 것을 알 수 있다. 즉, SF₆ 가스의 압력이 6[kgf/cm².abs]이고 전극간의 거리가 0.5mm이고, 반경의 0.5mm인 침전극의 대칭구조로 이루어진 small-gap에서 전극에 17kV의 전압이 인가 되면 small-gap은 절연파괴가 발생하며, 이때의 전계강도는 51.3kV/mm가 된다.

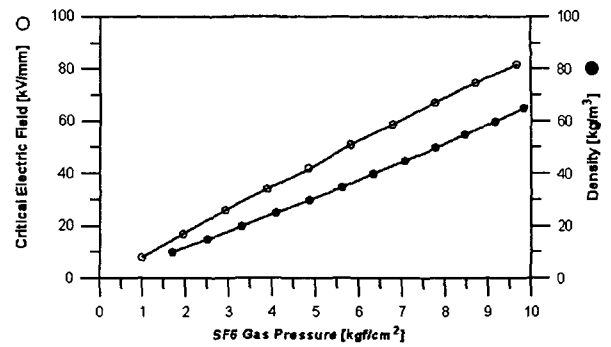


그림 3 SF₆ 가스의 압력에 따른 임계전계강도와 밀도
Fig. 3 Comparison SF₆ gas pressure with critical electric field intensity and density

그림 4는 전계해석의 결과로 제작된 small-gap의 형상을 보여주고 있다. 침전극의 대칭축에 대한 중심선 정렬을 위하여 지지구조물은 한 개의 절연물 조각을 이용하여 제작하였다.

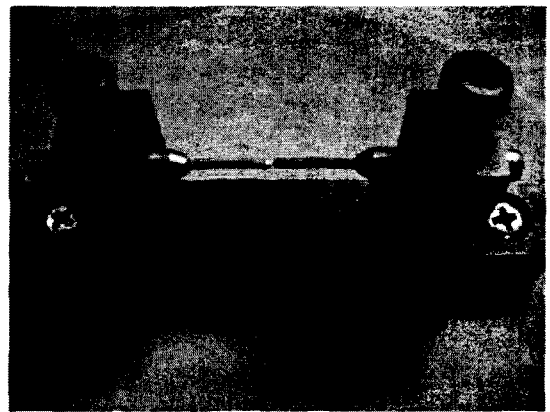


그림 4 small-gap의 형상
Fig. 4 shape of small-gap

2.2 Small-gap 측정시스템의 회로해석

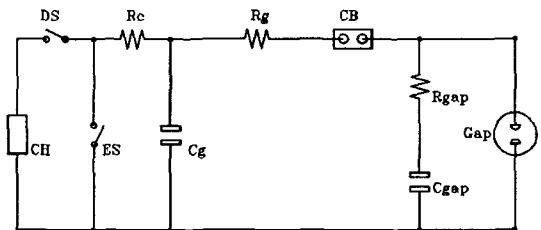


그림 5 small-gap 측정시스템 회로도
Fig. 5 Circuit diagram of small-gap measuring system

Gap의 조건에 대한 방전전압 특성을 구하기 위한 small-gap 측정시스템의 회로도를 그림 5에 나타내었다. 회로도에서 CH는 Cg를 충전하기 위한 충전장치, Cg는 Gap의 방전전압을 공급하기 위한 전압공급용 커패시터, Rg는 전류제한용 저항, Rgap 및 Cgap은 small-gap의 충전 전 시

정수를 결정하기 위한 회로소자, 그리고 Gap은 침전극으로 구성된 small-gap의 위치를 보여주고 있다. 측정시스템의 동작순서를 설명하면 다음과 같다. 먼저 DS를 투입하여 Cg를 설정된 전압 V로 충전한다. 그리고 DS를 개방한다. 초기 전압 V로 Cg가 충전되어 있는 상태에서 CB를 투입하면 Cgap는 Cg의 전압으로 충전을 시작한다. 이때 Cg의 충전시간은 시정수 $(Rg+Rgap)*(Cg*Cgap/Cg+Cgap)$ 의 값에 의하여 결정된다. Cgap이 충전되면서 Gap의 방전전압 조건에 이르게 되면 Cgap에 충전된 전하는 Rgap 및 Gap을 통하여 방전하게 되고 방전이 완료되면 Cgap는 다시 Cg의 전압에 따라 충전되면서 동일한 충방전 과정을 반복하게 된다.

Small-gap 측정시스템을 구성하기 위한 회로소자 용량 및 정격 그리고 Gap에서의 충방전 속도특성을 분석하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 해석은 ATPdraw 및 EMTP 프로그램을 이용하였으며 회로도에는 그림 6과 같다. small-gap에서의 현상은 전압제어용 스위치를 이용하여 해석을 수행하였다.

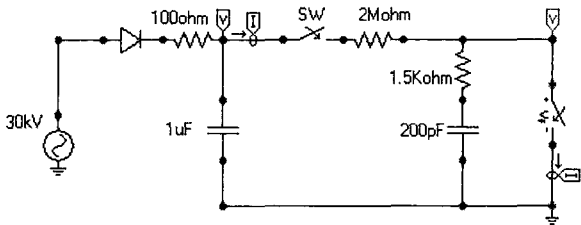


그림 6 Small-gap 측정시스템 회로도
Fig. 6 Schematic diagram of small-gap measuring system

그림 6의 회로도에 대한 수치해석을 수행하기 위한 동작 조건은 다음과 같다. 먼저 t=0인 순간에 1uF의 커패시터를 설정된 전압 30kV로 충전한다. 다음으로 t=5ms일 때, 스위치 SW를 투입한다. SW가 투입동작을 수행하면 2MΩ 및 1.5kΩ의 저항을 거쳐 200pF의 커패시터가 충전을 시작하게 되고, 전압제어용 스위치의 동작조건에 이르게 되면 200pF의 커패시터의 충전에너지는 1.5kΩ의 저항을 통하여 방전하게 된다. 이러한 충방전 과정을 반복 수행하면서 t=25ms가 되면 SW는 OFF동작을 수행하게 된다. 수치해석의 결과 중에서 Gap에서의 충방전 전압파형을 그림 7에 나타내었다.

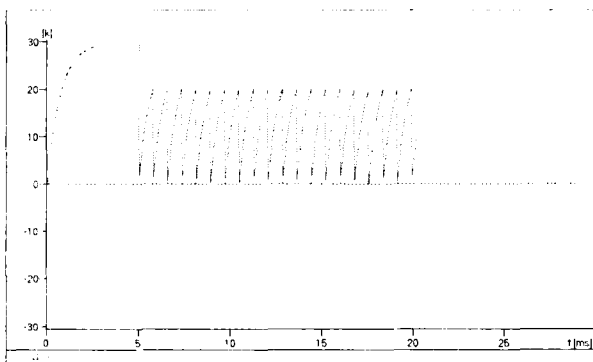


그림 7 Gap에서의 전압파형
Fig. 7 Voltage wave shape at Gap

그림 7의 충방전 전압파형에서 1주기에 대한 파형을 확대하여 그림 8에 나타내었다. 1회 충방전 시간은 약 0.8msec가 되는 것을 알 수 있다.

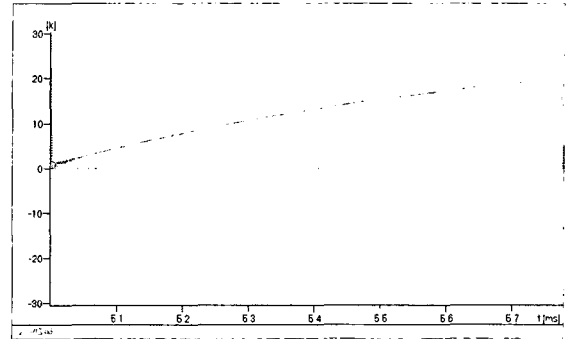


그림 8 Gap에서의 1주기 충방전 전압파형
Fig. 8 One period of Voltage wave shape

위의 해석결과를 적용하면 충방전 전압의 속도가 한 주기에 1ms이하인 small-gap 측정시스템을 구축하는 것이 가능해지며, 시스템 구성부품의 정격 및 용량을 결정할 수 있다.

2.3 Small-gap 측정시스템 제작

수치해석의 결과를 이용하여 small-gap 측정시스템을 제작하였으며, 각각의 회로소자에 대한 정격 및 용량을 정리하면 표 1과 같다. Gap에서의 전압파형은 Pulse Electronic Engineering Co. 사의 High Voltage Probe인 EP-50K를 이용하여 측정을 수행하였다.

표 1 회로정수 값
Table 1 Circuit parameter's value

기호	정격 및 내압조건	용도
Cg	1uF / 70kVdc	전원공급
Rg	2Mohm / 100kV	회로보호
Rgap	1.5kohm / 100kV	Gap 특성평가
Cgap	200pF / 40kV	Gap 특성평가

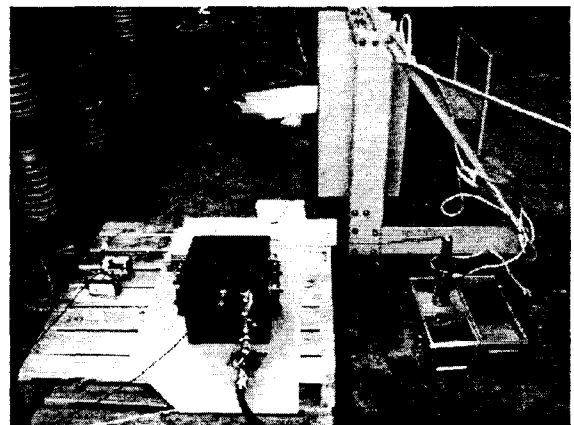


그림 9 small-gap 측정시스템 전경
Fig. 9 Small-gap measuring system

그림 9는 제작된 small-gap 측정시스템의 전경을 보여주고 있으며, 그림 10은 SF₆ 가스의 압력조건을 변경시킬 수 있는 시험용 챔버의 모습과 내부에 설치된 small-gap의 형상을 보여주고 있다.

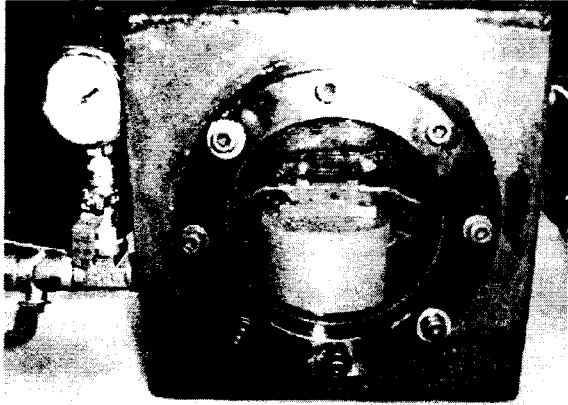


그림 10 small-gap의 설치전경
Fig. 10 Shape of small-gap

전극간 거리가 0.5mm이고, SF₆ 가스의 압력이 6[kgf/cm².abs]인 경우 Gap에서의 충방전 전압특성에 대한 시험결과를 그림 11에 나타내었다.

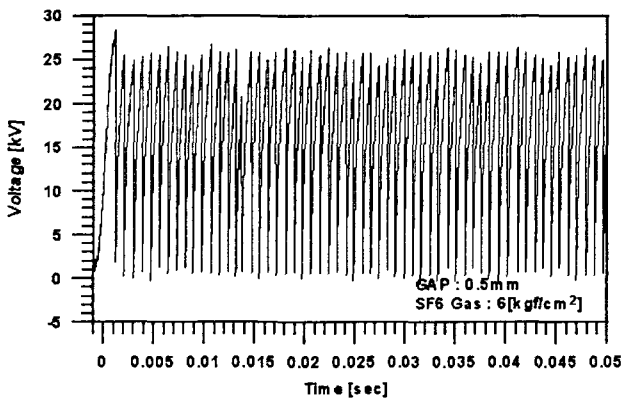


그림 11 Gap에서의 전압파형
Fig. 11 Voltage wave shape at Gap

그림 11의 시험결과로부터 충방전 전압파형에서 방전전압의 크기가 계속해서 변하고 있음을 볼 수 있다. 먼저 1차 방전 전압이 가장 큰 값을 가지는데 이는 시험회로를 동작을 시키기 위하여 사용된 진공차단기의 투입 시 발생하는 아크점점의 체터링(chattering) 현상에 의하여 발생하는 것으로 판단된다. 2차 방전 이후 방전전압의 크기는 방전과정이 반복되면서 침전극의 표면상태에 따라 변하는 것으로 판단된다. 아크점점의 체터링 현상에 의하여 발생하는 1차 방전전압의 파형을 무시한 이후의 방전전압의 평균값은 약 25kV가 되는 것을 알 수 있다. 이는 전계해석을 통하여 얻

어진 17kV의 약 1.5배에 해당하는 값으로 이는 Small-gap을 구성하는 침전극의 중심정렬 및 침전극 사이의 길이에 대한 오차에 의하여 발생하는 것으로 판단된다.

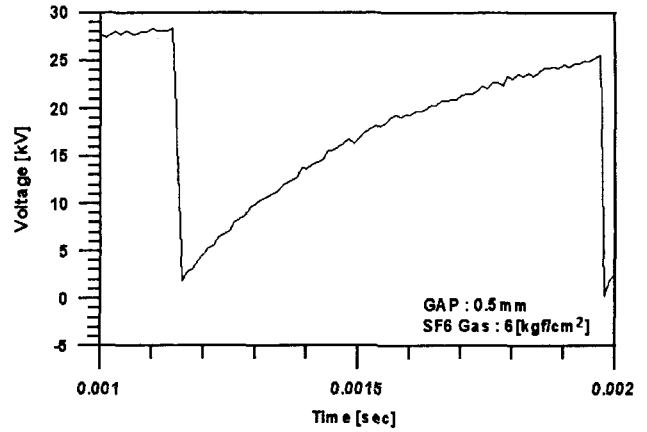


그림 12 1주기 충방전 전압 파형
Fig. 12 One period of Voltage wave shape

그림 11의 시험결과 중에서 1주기 충방전 전압 파형을 확대하여 그림 12에 나타내었다. 그림 12의 측정결과로부터 1회 충방전 전압의 시간은 약 0.85ms가 되는 것을 알 수 있다. 이 결과는 제작된 small-gap 측정시스템을 이용하는 경우, 차단기 내부에서 발생하는 SF₆ 가스의 이동 속도에 대하여 샘플시간 1ms의 영역에서 측정이 가능하다는 것을 의미한다.

Small-gap 측정시스템을 이용하여 시험을 수행하는 경우, 진공차단기의 접점이 OFF 될 때까지, small-gap에서의 충방전 과정이 반복되기 때문에 전극의 표면은 계속해서 손상을 입게 된다. 따라서 방전전압의 평균값에서 오차가 크게 발생하는 경우에는 침전극을 교체하여야 한다. 그림 13은 충방전 시험을 수행하기 전과 후의 침전극의 표면의 상태를 보여주고 있다.

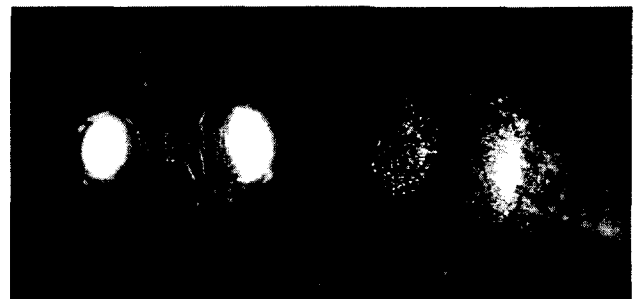


그림 13 시험전과 후 전극의 표면형상
Fig. 13 Electrode surface before test and after

침전극의 거리가 0.5mm 0.3mm인 경우에 대하여 SF₆ 가스 압력조건을 6[kgf/cm².abs]에서 2[kgf/cm².abs]로 변화시키면서 측정된 방전전압의 평균값을 정리하면 그림 14와 같다.

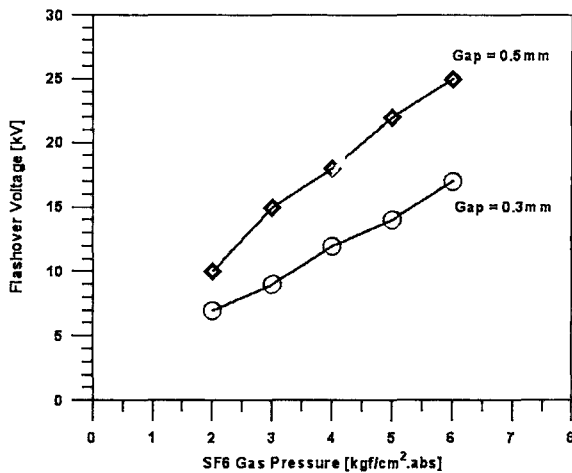


그림 14 Small-gap의 특성시험 결과

Fig. 14 Comparison SF₆ Gas pressure and Flashover voltage

3. 결 론

본 논문에서는 차단기 내부에서 발생하는 SF₆ 가스의 이동속도를 측정하기 위한 small-gap 측정시스템에 관한 연구 내용을 정리하였다. 설계 및 제작된 small-gap 측정시스템의 충방전 전압파형은 특성시험의 결과로부터 한 주기가 1ms 이하가 된다는 것을 파악하였다. 이러한 연구결과는 SF₆ 가스차단기가 동작하는 동안에 차단부에서 발생하는 SF₆ 가스에서 이동속도를 샘플시간 1ms의 영역에서 측정하는데 활용할 수 있다.

또한 small-gap을 구성하는 침전극 사이의 길이가 0.5mm, 0.3mm인 일때, SF₆ 가스의 압력을 6[kgf/cm².abs]에서 2[kgf/cm².abs]로 변화시켜가면서 침전극에서의 방전전압에 대한 평균값을 정리하였다. 침전극의 간격과 SF₆ 가스 압력 조건에 따른 방전전압의 측정결과는 차단기가 동작하는 동안 차단부에서 발생하는 SF₆ 가스의 이동속도에 따른 밀도의 변화를 측정하고 분석하는데 활용할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] T. Yoshizumi, "Hot Gas Flow Analysis IN SF₆ Gas Circuit Breaker During The Short Circuit Interruption", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, pp. 1757-1763, July 1989.

[2] G.J. Cliteur, "Calculation of the Uniform Breakdown Field Strength of SF₆ Gas", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No. 6, pp. 843-849, December 1998.

[3] Toshiyuki Uchii, "Effects of Hot SF₆ on Post-Arc Circuit Breaker Design", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 1, pp. 124-130, January 2004.

[4] M. Okamoto, "COMPUTER SIMULATION PHENOMENA ASSOCIATED WITH HOT GAS IN PUFFER-TYPE GAS CIRCUIT BREAKER", IEEE

Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 2, pp. 833-839, April 1991.

[5] Yasushi Hayashi, "Investigation of Hot-Gas Flow in SF₆ Gas Circuit Breakers" IEE of Japan Power & Energy'95, pp.269-274,

[6] Yasushi Hayashi, "Diffusion Process of Hot-Gas Flow During the Short Circuit Current Interruption of SF₆ Gas Circuit Breaker", GD95, I pp390-393, Sep. 1995

저 자 소 개



정진교 (鄭鎭敎)

1967년생. 1991년 강원대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1994년 강원대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 신전력기기연구그룹 선임연구원
Tel : 055-280-1564
Fax : 055-280-1589
E-mail : jkchong@keri.re.kr



김홍규 (金烘桂)

1969년생. 1995년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1997년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2001년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(공학박사). 현재 한국전기연구원 신전력기기연구그룹 선임연구원.
Tel : 055-280-1568
Fax : 055-280-1589
E-mail : kimhk@keri.re.kr



송기동 (宋基東)

1963년생. 1988년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 인하대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한국전기연구원 신전력기기연구그룹 책임연구원.
Tel : 055-280-1563
Fax : 055-280-1589
E-mail : kdsong@keri.re.kr



이우영 (李佑暎)

1957년생. 1980년 경북대 공대 전자공학과 졸업(학사). 1982년 경북대 대학원 전자공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 신전력기기연구그룹 책임연구원

Tel : 055-280-1572

Fax : 055-280-1589

E-mail : wylee@keri.re.kr



박경엽 (朴敬燁)

1957년생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 영국 Liverpool 대학 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한국전기연구원 신전력기기연구그룹 그룹장(책임연구원)

Tel : 055-280-1561

Fax : 055-280-1589

E-mail : kypark@keri.re.kr