

1. 서 론

가스절연개폐장치에 있어서 急峻過渡振動波 電壓의 발생과 絶緣特性

河村達雄* · 李 福熙**

(일본 동경대학 생산기술연구소

교수* · 박사 연구원**)

6불화황(SF₆)가스와 같은 절연특성이 우수한 부성가스와 그의 혼합가스를 이용한 가스절연시스템은 다른 절연방식에 비하여 전력기기의 소형화, 경량화, 운전 및 보수의 간편화, 전력계통의 고효율적 운전특성 등 여러 가지 잇점이 있어 이 분야에 대하여는 약 20여년전부터 세계적으로 연구의 관심대상이 되어 왔으며, 많은 연구 성과가 발표되었고 현재 선진기술국에서는 전력용 기기 분야에 가스절연시스템이 실용화되고 있다.^{1)~4)}

그러나 가스절연개폐장치(Gas Insulated Switchgear : GIS) 중에서 단로기, 차단기의 개폐조작중이나 지락 고장이 생기게 되면 急峻過渡振動波 電壓(Very Fast Transients : 이하 VFT라略한다)가 발생하여 GIS의 구성품 및 계통에 연결되어 있는 전력기기, MOF의 2차 측에도 영향을 미쳐 GIS의 절연파괴나 변압기, 부상부에서의 절연파괴, 계통의 연속적인 절연파괴를 일으키는 MOF의 共振現象, 제어장치 및 보호계전기의 전자 회로에까지 장애를 끼치는 문제점이 대두되었다.

따라서 세계적으로 GIS에 관한 연구는 VFT의 발생과 이의 영향 및 절연특성에 대하여 중점적으로 이루어지고 있다.

본 報告에서는 국내에서의 이 분야에 대한 연구의 활성화를 위하여 GIS에 있어서 단로기 서-지를 대표하는 급준파진동성 서-지에 대한 절연특성으로서 VFT의 발생과 그의 영향 및 전력기기의 절연특성에 대하여 1988년 CIGRE 연구위원회에서 논의된 내용을 기초로 하여 기술하고자 한다.

2. 본 론

2.1 VFT의 발생

2.1.1 VFT란

수변전설비에 있어서 단로기는 일반적으로 전류를 차단하지 않는 것으로 고려되지만 실제의 전력시스템에서는 직렬로 접속되어 있는 차단기까지 電路의 충전전류를 개폐하게 된다. 따라서 이 개폐조작시에는 다수회의 재점호현상과 前驅放電을 일으켜 이것에 의하여 단로기 서-지라고 하는 고주파의 과도진동성전압이 발생하며, 이를 急峻過渡振動性電壓(Very Fast Transients : VFT)

차 례

- 1. 서 론
- 2. 본 론
 - 2.1 VFT의 발생
 - 2.2 VFT의 분류와 영향
 - 2.3 VFT에 대한 절연특성
- 3. 결 론

라 한다. 이 VFT의 파형 및 진폭은 GIS의 규모, 발생 지점, 전력기기, 주변의 장치에 따라 변화하며, 대체로 과도주파수는 수십 KHz~수십 MHz 정도이다.

단로기의 조작빈도는 비교적 높으며, 발생하는 과전압은 대단히 높을 뿐만 아니라 이의 최고폭치가 수백회에 1회 정도의 비율로 발생하는 確率現象이다. 또한 발생빈도는 회나 차단기에 의한 고장차단에 비하여 압도적으로 높아 절연설계상에 중요한 파라미터가 된다.

2.1.2 VFT의 발생 메카니즘^{6)~10)}

단로기로 충전된 전로를 개폐할 때 재점호 현상 또는 前驅放電을 반복하게 되면 VFT가 발생하게 되는데, 이의 발생원리에 대하여 기술한다. 그림 1은 단로기로 인가전압에 의하여 충전된 전로를 개폐할 때 전원측전압과 부하측 전압의 변화를 도식적으로 나타낸 것이다.

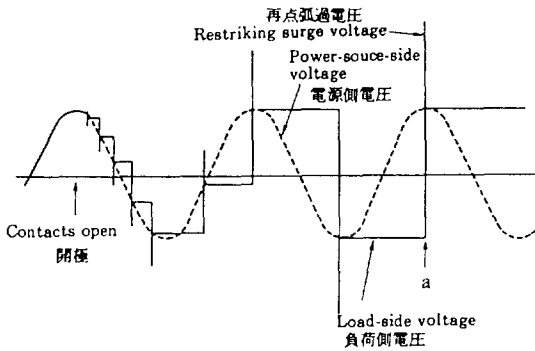


그림 1. 단로기로 충전전류를 개폐할 때의 전압변화

그림 1의 a점에 나타난 바와 같이 상용주파수전압의 파고치(-1 pu)가 부하측에 충전되고 전원측전압이 역극성의 파고치(+1 pu)에 도달했을 때 재점호가 일어나게 되면 최대의 서-지전압이 발생한다. 그러나 실제의 경우에는 단로기의 부하측에 -1 pu의 殘留電壓이 유지되는 경우는 대단히 드물다.

단로기 개폐조작에 의해서 GIS의 구성품에 인가되는 急峻過渡振動波電壓은 단로기에서 발생한 急峻의 과전압이 GIS내를 傳播하고, 왕복반사에 의하여 발생되며, 단로기의 특성, GIS의 구성, GIS에 접속되어 있는 가공송전선, 케이블, 변압기의 파라미터 등 주변의 전력기기의 특성에 의존한다.

간단한 회로구성에서 VFT발생의 기본원리는 그림 2와 같이 설명할 수 있다.

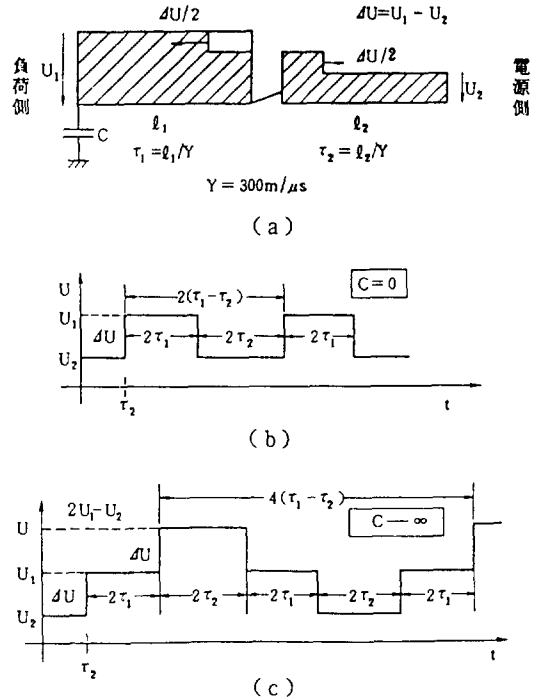


그림 2. VFT의 발생원리

그림 2의 (b), (c)는 단로기가 극간전압 $\Delta U = U_1 - U_2$ 로 재점호되어 극성이 반대이며 진폭이 $\Delta U/2$ 의 구형파인 서-지가 전원측과 부하측에 전파될 때 부하측회로단의 서-지전압이다. 그림 2의 (c)가 더 큰 서-지전압을 발생하는 경우로 부하측의 잔류전압이 $-U_1$ 이면 $U_{max} = 3U_1 - 0.5U_1$ 이면 $U_{max} = 2.5U_1$ 으로 된다. 극간전압 ΔU 는 단로기의 특성, 개폐하는 부하의 상황, 개폐순서 등에 따라 변화하기 때문에 단로기 서-지를 계산할 때는 개폐조건에 대응하는 극간전압 ΔU 를 선정해야 된다.

단로기의 재점호에 의해서 발생하는 전압의 크기가 얼마로 될 것인가 하는 것은 確率現象으로 대체로 그림 3에 나타난 바와 같은 범위이며, 단로기의 특성이나 GIS의 규모에 따라서는 차이가 있음은 밝혀졌으나 정량적인 분석은 아직도 밝혀지지 않아 금후의 연구과제로 남아 있다.

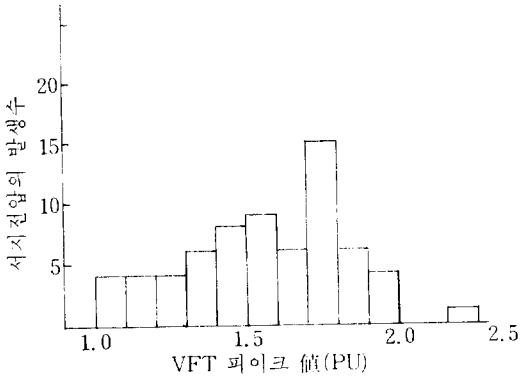


그림 3. GIS에서 64회의 개폐조작시 발생한 VFT 피크치의 분포 예

2.1.3 遮斷-再点弧現象의 해석^{1), 11), 12)}

단로기로 인가전압으로 충전된 충전전류를 차단하는 경우 다수회의 재점호현상이 발생하여 VFT가 발생하는데 이의 피크치는 회로조건이나 GIS의 가스압력, 개극속도, 절연회복속도 등에 의해서 결정되며, 그림4와 같은 단상등가회로에 대한 해석예를 기술한다.

재점호시의 전압, 전류를 그림4의 회로에서 구하면 다음 식과 같이 된다.

재점호 전압 : U_b

$$U_b = U_m \sin \phi - U_c \quad (1)$$

재점호전류 : i

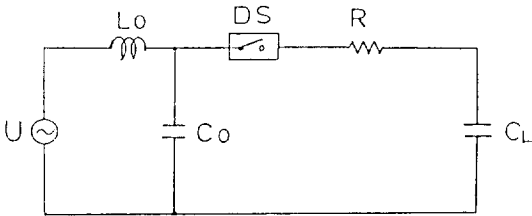


그림 4. 단상등가 시험 회로

$$i = I_m \cos(\omega_0 t + \phi) - I_m \cos \phi \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cos \omega t + \frac{C_L}{C} \cdot \frac{U_b}{Z} \sin \omega t \quad (2)$$

차단시 전류변화율 : di/dt

$$\frac{di}{dt} \approx -\omega_0 I_m \sin(\omega_0 t + \phi) + \omega I_m \cos \phi \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \sin \omega t + \frac{C_L}{C} \cdot \frac{U_b}{L_0} e^{-\frac{t}{\tau}} \cos \omega t \quad (3)$$

부하캐패시턴스전압 : U_c

$$U_c \approx U_m \sin(\omega_0 t + \phi) - Z I_m \cos \phi \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \sin \omega t - \frac{C_L}{C} \cdot U_L \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cos \omega t \quad (4)$$

여기에서 U_m : 인가전압의 파고치

I_m : 차단전류의 파고치

ϕ : 재점호시의 인가전원전압의 위상각

U_c : 재점호직전의 부하캐패시턴스의 충전전압

ω_0 : 상용주파수 각속도 $\omega = 1/\sqrt{L_0 C}$

$\tau = 2L_0 / R$ $Z = \sqrt{L_0 / C}$

한편 전원측의 캐패시턴스 C_0 에는 재점호시에 C_0-R-C_L 및 이 회로의 인덕턴스에 의해서 고주파의 진동과 전압이 중첩되며, 이 때 전류의 변화율 di/dt 가 대단히 크기 때문에 C_0, C_L 양단의 전압이 거의 같게 될 때까지 진동은 계속된다. 또한 이 진동과 전압의 파고치 U_s 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$U_s = U_m \sin \phi - \gamma \frac{C_L}{C} \cdot U_b \quad (5)$$

γ : 진폭률

위에서 표현한 전압, 전류의 변화를 도식적으로 나타내면 그림5와 같다. 그림5에서 A점과 B점에서 재점호가 발생하며, 그 때문에 부하측 캐패시턴스에는 재점호전과 반대극성의 相電壓波高值보다 높은 전압이 잔류하게 된다. 이와 같은 상태에서 재점호와 차단을 반복하게 되면 대단히 위험한 서-지로 되는 경우도 있다. 또 재점호에 이르기까지의 과정으로서는 일반적으로 전원전압과 부하캐패시턴스의 잔류전압과의 차가 다음 식으로 표현되는 단로기극간의 파괴전압 U_r 과 같게 될 때 재점호가 일어나는 것으로 가정한다.

$$U_r = a \cdot R_n \cdot E_K \cdot (t - t_0) \quad (6)$$

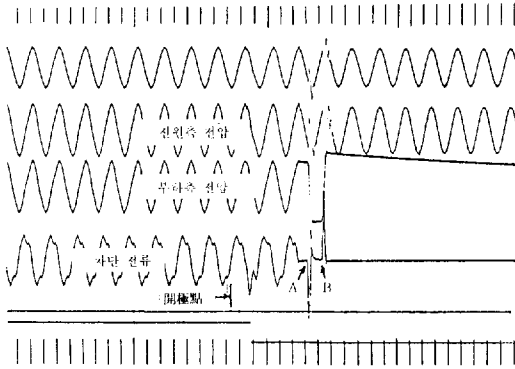


그림 5. 차단시의 전압·전류파형의 변화

여기에서 α : 극성차에 의한 계수
 R_n : 정규분포로 가정할 때의 보정계수
 E_K : 절연회복속도 (v/s)
 t : 개극후의 시간

t_0 : 개극후 가동자가 고정자로부터 떨어지기까지의 시간

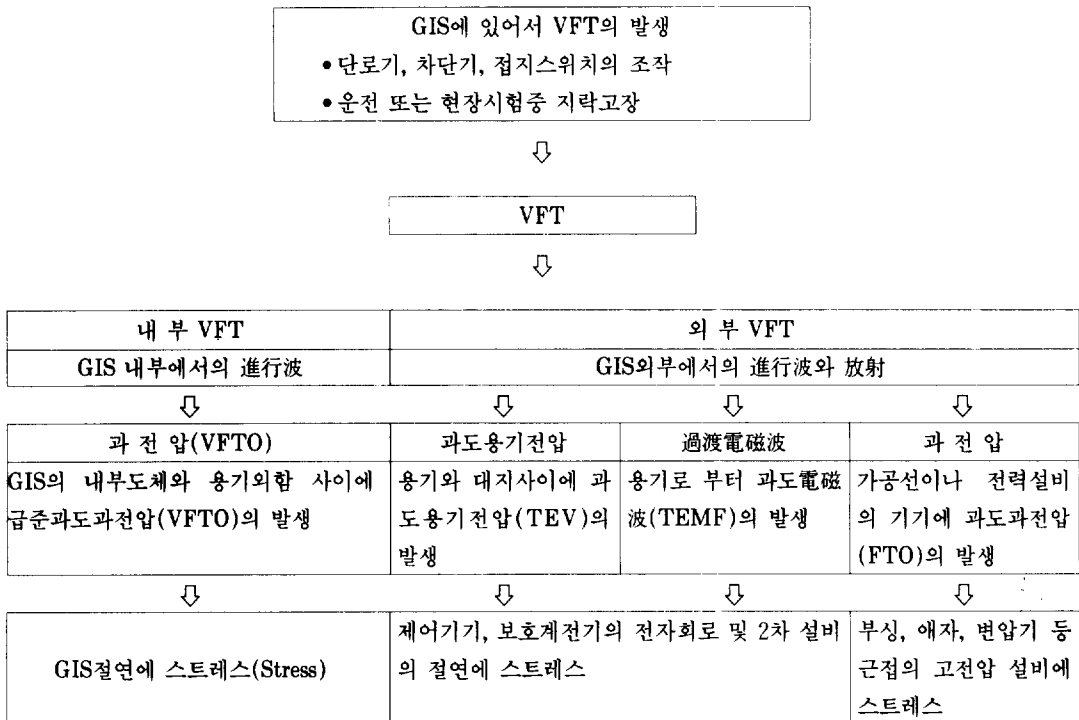
이상의 과정을 살펴보면 단로기의 특성은 식(6), 단로기의 차단능력의 한계는 식(3)에 의하여 정해진다.

2.2. VFT의 분류와 영향^{(6), (13)~(15)}

VFT는 GIS중에서 발생한 시점에서는 4~7(ns)의 급준적인 상승시간을 가지나 변전소의 규모에 따라 수십 KHz~수십MHz의 단일주파수로 되기도 하며, 부상을 통과하거나 GIS의 조작에 의해서 파형 즉, 주파수와 진폭은 변화한다.

VFT를 발생원으로부터의 거리에 따라 내부 VFT와 외부 VFT로 분류할 수 있으며, VFT현상은 GIS내외부의 댐핑 효과와 전력설비의 레이아웃 (layout)으로 결정되는 進行波의 반사에 의해서 변화한다. GIS에서 발생하는 VFT와 전력설비의 기기에 미치는 영향을 간략히 나타내면 표1과 같다.

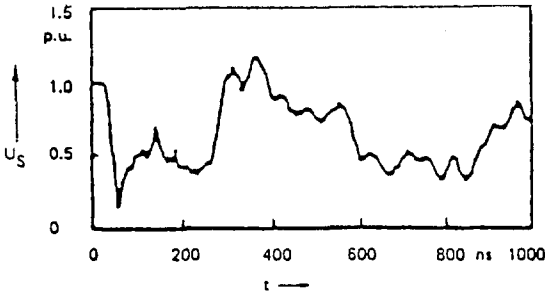
표 1. VFT의 분류와 영향



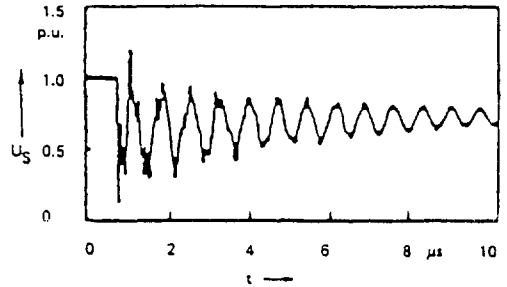
2.2.1 내부 VFT

그림6은 110KV급 GIS에서 단로기의 조작중 발생한

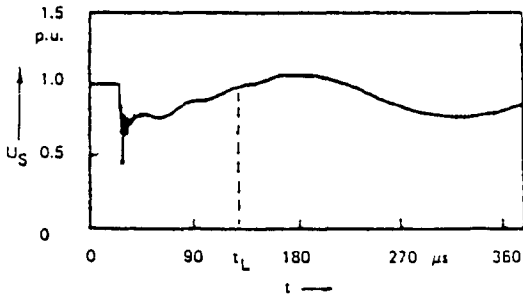
결과적으로 내부 VFT는 대체로 수십 KHz에서 수십 MHz까지의 범위의 많은 고주파성분을 가진 파형으로



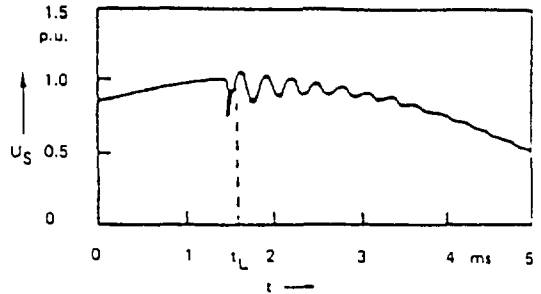
(a) 급준과도과전압(ns)



(b) 수 μs후 단일주파진동전압(μs)



(c) 변압기와 GIS의 진동에 의한 전반적인 과도전압 (20~100KHz)



(d) 저주파 과도전압과 정상상태 조건(ms)

그림 6. 단로기의 개폐조작에 의해서 발생하는 여러가지의 VFT.

VFT를 용량분압기로 측정된 결과의 대표적인 예를 나타낸 것이다.

SF₆가스중에서 발생하는 급준적인 불꽃방전은 그림 6의 (a)에 나타낸 바와 같이 4~7(ns)의 상승시간을 가지는 급준파 임펄스를 유지시킨다. 이 급준임펄스는 GIS 중을 진행파로서 작용하여 반사와 투과를 반복하게 된다. 수 μs 이후에는 단로기의 부하측과 전원측에서 단일 주파수의 파형이 관측되며, 불꽃 방전후 약 100 μs후에는 단로기의 아-크는 전류가 적게 되어 소멸된다. 따라서 부하측은 전하가 잔류하게 되며, 전원측의 변압기에서는 안정상태로 되기까지 회로정수에 의하여 정해지는 固有周波數의 電位振動을 일으키게 된다.

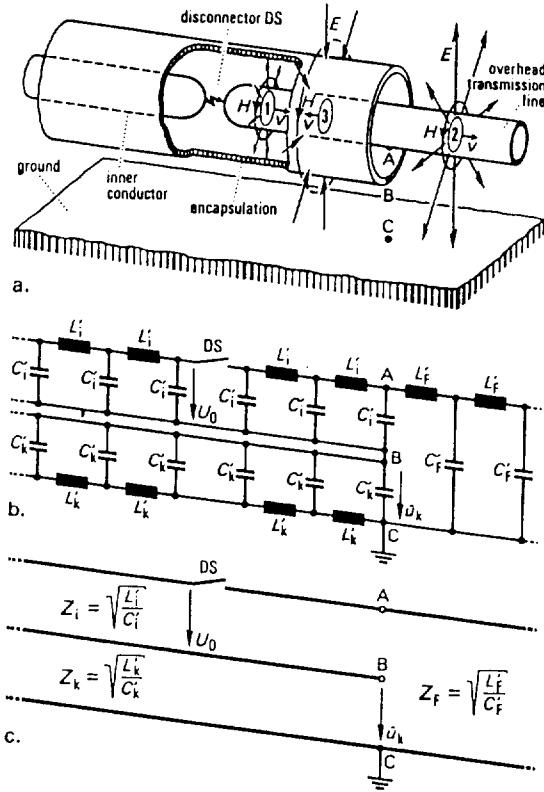
되며, 또한 매우 급준한 상승시간을 가지는 임펄스를 포함하는 複合波이다. 대개의 경우 단로기의 개폐조작시 급준파임펄스는 약 200회 정도의 왕복반사를 일으키며, 역위상 차단시에는 전원전압의 2.5pu 정도의 과전압도 발생한다.

2.2.2 외부 VFT

① 과도용기전압(TEV)

GIS에서 발생하는 내부 VFT에 대하여는 進行波理論에 의해서 잘 설명되어진다. 짧은 분기에서 일어나는 반사가 가장 가혹하며, 이것은 반사파가 중첩되어 높은 진폭으로 되기 때문이다. 내부VFT와 마찬가지로 진행파

이론을 적용하여 GIS용기에 유도되는 과도전압(Transient Enclosure voltage: TEV)대하여도 그림7에 나타난 것과 같이 설명할 수 있다.



- a. 단로기의 조작에 의해 발생한 進行波의 傳播
 ① 내부 동축 모선
 ② 가공송전선
 ③ 대지와 외함과의 간격
- b. a에 대한 집중정수로의 표시
- c. 무한장의 회로로 가정하여 과도용기전압 U_k 의 계산을 위한 단선도

그림 7. 과도용기전압(TEV)에 대한 간단한 설명도

GIS내부에서 발생한 VFT는 모선 ①를 통하여 진행파로서 전파되어 부싱에 도달된다. 여기에서 GIS의 용기 ③전압의 과도상승을 일으키며, 계속하여 가공송전선②을 타고 전파되어 계통에 접속되어 있는 전력기기의 절연에 스트레스(stress)를 주게 된다.

그림7의 (a)에서 가공송전선은 GIS에 직접 접속되어 있으므로 만일 단로기에서 불꽃방전이 생기게 되면 대체적으로 0.5pu 크기의 진행파가 모선의 끝을 향하여 전파되어 간다. 진행파가 모선의 끝에 도달하였을 때 電磁界가 모선의 주위에 발생하게 되고 용기전위의 과다상승을 일으킨다. 간략하게 나타낸 그림7 (c)의 등가회로를 이용하여 過渡容器電壓(Transient Enclosure Voltage: TEV)의 산출이 가능하며, SF₆ GIS의 모선, 용기-대지간, 가공송전선의 서-지임피던스를 각각 Z_i , Z_k , Z_r 라 하여 TEV의 피크치 U_k 를 구하면 다음 식과 같다.

$$U_k = -U_0 \frac{Z_k}{Z_i + Z_k + Z_r} \quad (7)$$

단, 식(7)은 급준과도과전압(VFTO)의 피치와 AC전압의 최대치의 비를 나타내는 변전소의 응답특성을 포함하고 있지는 않다.

위의 식(7)을 이용하여 간단히 TEV의 피크치 U_k 를 계산할 수 있으므로 TEV를 줄일 수 있는 기본적인 방법도 생각할 수가 있다. 대체로 TEV의 피크치 U_k 는 약 10KV 정도이고, U_k / U_0 의 비는 약 10~30(%)의 범위이며, 특히 용기-대지간의 서-지임피던스 Z_k 에 의하여 현저히 변화한다. 따라서 가능한한 서-지 임피던스 Z_k 를 작게하면 TEV의 피크치 U_k 도 작게 되므로 Z_k 를 줄이면 된다. 이 서-지임피던스 Z_k 를 줄일 수 있는 방법으로는 다음의 3가지가 고려되어 진다.

- ㉑ GIS용기의 직경을 크게 한다..... 비현실적이다.
 ㉒ 모선의 높이를 낮춘다.....가능하나 절연내력한계를 고려하면 매우 제한적이다.
 ㉓ 그림7에서 B와 C사이의 서-지임피던스 Z_k 를 단락한다.....가장 실용적인 방법이다.

그러나 ㉓의 경우에도 TEV에는 고주파성분이 포함되어 있기 때문에 저임피던스로서 작용한다.

② 과도 전자계(TEMF)

과도용기전압(TEV)의 발생에 의해서 GIS의 용기나 가공송전선으로부터 電磁界가 발생하는데 이를 過渡電磁界(Transient Electromagnetic Field: TEMF)라 하며, 磁界와 電界는 거의 같은 주파수이고 강도는 대체로 수십 A/m 정도이다.

이 전자계는 2차측 제어기기의 전자회로나 큐비클내

에 전압을 유지시켜 절연상에 스트레스를 주게 되며, 특히 CPU를 이용하는 제어장치를 사용하고 있을 때는 이의 영향을 충분히 고려하지 않으면 안된다.

③ 주변기기에 유도되는 과도과전압(FTO)

외부의 기기에 영향을 미치는 VFT의 제2의 형태는 가공송전선을 전반하는 진행파이며, 이 過渡過電壓(Fast Transient Overvoltage: FTO)에 의해서 주변에 접속되어 있는 기기는 스트레스를 받게 된다. 예를들어 변압기에 이 FTO가 침입하게 되면 電位振動現象이 일어나게 되며, MOF에 침입하게 되면 共振現象을 일으키게 되어 계통의 연속적인 고장을 일으킬 위험성도 내포하고 있다. 따라서 GIS의 설계·연구시에는 이의 영향으로 인한 변압기의 전위진동에 대한 성능을 고려하지 않으면 안된다.

2.3. VFT에 대한 절연특성^{7), 13), 16)~22)}

2.3.1 VFT에 의한 지락

단로기의 개폐조작중에 발생하는 재점호에 의한 과전압은 단로기자체에도 인가되는데 일반적으로 회로의 개방단에서는 나타나지 않으므로 과전압의 크기는 GIS내에서 과전압의 최고치보다는 낮으며, 현재까지 보고된 바에 의하면 모든 GIS에 있어서 VFT의 최고치는 2.5pu 정도라고 생각해도 좋다. 그러나 실제로는 재점호 아크가 발생하는 곳에 과전압이 인가되기 때문에 地絡故障을 유발시키기 쉬우며, 이에 대하여 보고된 예도 상당수 있다. 재점호가 발생할 때 지락고장을 유발시키는 과정에 대하여는 거의 정설이 발표되었다.

그림8에 나타난 바와 같이 재점호가 발생하기 전에 단로기의 접촉자사이에 인가된 전압에 의해서 접촉자로부터 각방향으로 樹枝狀의 리더(leader)가 발생한다.(그림8의 (a))

그후 접촉자사이의 리더가 성장하여 재점호 방전을 일으켜 양 접촉자, 재점호아크, 각 방향의 리더와 외함사이에 과전압이 인가된다.(그림8의 (b), (c)) 이로 인하여 외함 방향의 리더가 성장하여 결국 지락고장을 유발시키게 된다.(그림8의 (d))

전력설비에 있어서 과전압이 발생하는 곳은 상당히 광범위하므로 피뢰기를 사용하여 발생하는 모든 과전압을 억제하는 것은 경제적으로 불가능하다. 따라서 GIS

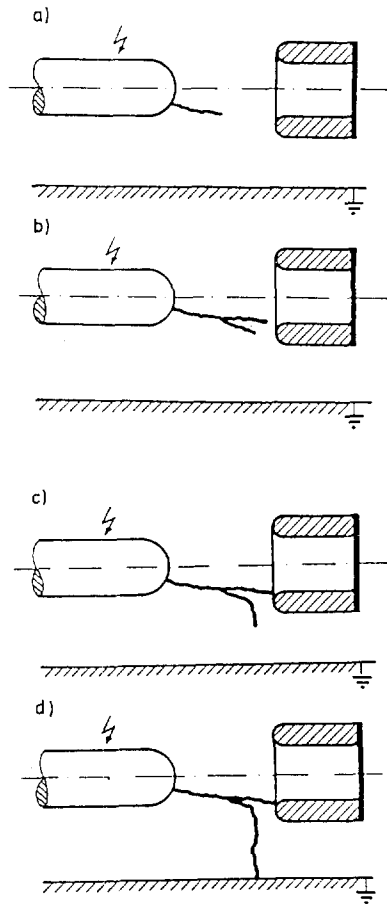


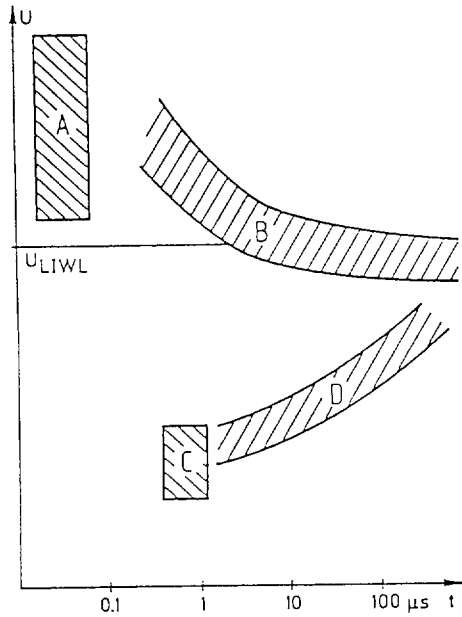
그림 8. 단로기의 개폐조작동안 리더방전에 의한 지락고장의 진전과정

에 있어 과전압을 억제하는 방법으로서 저항을 병렬로 연결한 단로기가 제안되기도 하였으나 이 저항의 접속은 GIS의 절연강도를 저하시킴으로 전반적인 이용성의 효율화에 대하여는 아직 연구의 과제로 남아 있다.

2.3.2 VFT에 의한 절연파괴

GIS의 절연성능을 평가할 때는 통상 전압-시간 특성(V-t 특성)에 의하므로 본 보고에서도 V-t 특성에 대하여 기술한다. 그림9는 표준뢰임펄스와 VFT가 인가되었을 때 정상 절연상태와 針狀의 돌기물에 의한 불안전절연상태(불평등전계의 형성)에 대한 V-t 특성의 전반적인 경향을 나타내고 있다.

아울러 그림10은 VFT에 의한 절연파괴진전과정에



- A : VFT } 정상절연상태
- B : 임펄스 } 정상절연상태
- C : VFT } 돌기물에 의해 불평등전계가 형성된 불
- D : 임펄스 } 안전 절연상태

그림 9. 주요 전압-시간특성

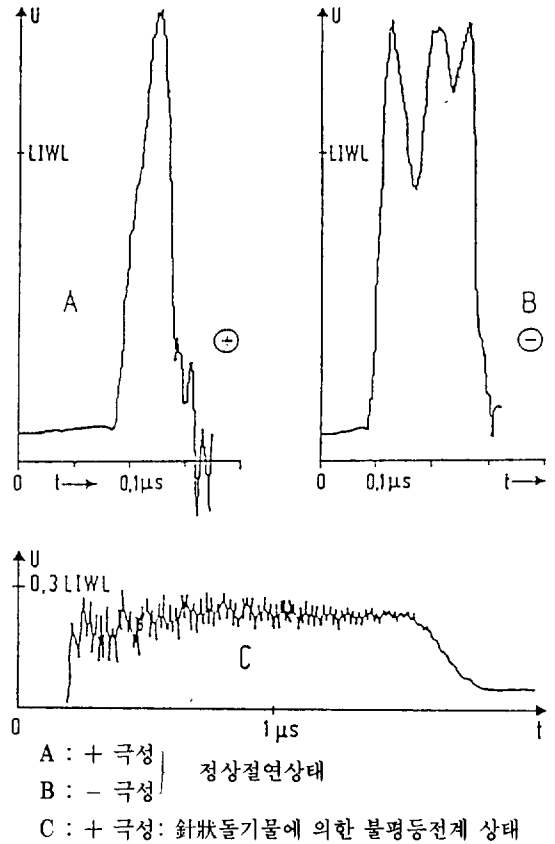


그림 10. VFT에 의한 절연파괴진전

대한 예를 나타내고 있다. 정상절연 GIS에서의 절연파괴와 스페이스의 불꽃방전특성은 스페이스의 설계시 불평등전계 부분이 극히 적으며 방전진전과정에 대한 면적효과가 매우 낮으므로 거의 유사하다.

VFT에 의한 불꽃방전전압은 그림9의 A와 같이 리임펄스절연레벨(Lightning Impulse Withstand Level: LIWL) 보다 높고, -극성의 경우가 절연파괴 전압도 높으며 편차도 대단히 크다. 따라서 정상절연상태의 GIS에 있어서는 급峻과도전압(VFTO)에 대한 절연상의 문제점은 없으나 그림9의 C에 나타난 바와 같이 돌기물과 같은 이물질이 존재할 때의 절연파괴전압은 대단히 저하된다. 이것은 주로 코로나 방전의 안정화작용이 단시간영역에서는 극히 감소하는 것과 리더의 개시조건이 변화하기 때문에 기인되는 것으로 고려되어진다. 이때의 절연파괴는 그림10의 C에 나타난 바와 같이 진동의 파미부분에서 일어나며 편차도 매우 크다.

절연파괴전압의 크기는 정(+)극성의 경우가 대체로

부(-) 극성의 경우보다 낮다. 따라서 GIS에 있어서 VFT에 의한 절연파괴는 이물질이 존재하여 불평등전계가 형성되는 경우에는 대단히 일어나기 쉬우므로 극력 이물질의 혼입에 주의하여야만 된다.

3. 결 론

가스 절연개폐장치(GIS)에 있어서 단로기 또는 차단기의 개폐조작시 지락고장이 생겼을 때는 급峻과도전압(VFT)가 발생한다. 이 급준파의 크기는 단로기의 개폐조작시 재점호가 일어날 때나 대지절연파괴를 일으킬 때의 극간전압차(ΔU)에 의하여 결정되며, 반사와 전반에 의해 중첩된 進行波로 되는 이른바 급준과도과전압(VFTO)로 된다. 이 VFT의 상승율(rising time)은 표준리임펄스전압보다 크며, 최초의 파두장은 4~7(ns)의 것도 있다. 또 이 VFT전압은 GIS내부 뿐만아니라 가공

송전선과 대지간, GIS의 용기와 대지사이 등 외부에도 나타난다. 따라서 GIS의 내부와 외부에서 VFT의 스트레스가 나타나므로 GIS의 설계시에 충분히 고려하여야만 된다.

지락고장에 의해 발생하는 용기과도전압(TEV)도 불꽃방전시에는 인가전압의 2배 정도로 되는 경우도 있으므로 절연설계 및 현장시험시에 고려할 필요가 있다.

단로기의 개폐조작시 발생하는 VFT의 피크치를 최악의 경우로 상정할 때는 절연레벨을 상당히 저하시키며, 특히 GIS내에 돌기물과 같은 이물질이 존재하여 불평등전계를 형성할 때는 절연파괴전압이 대단히 저해된다.

변압기나 부싱 등과 같은 전력기기에서는 외함과 접지사이의 전압을 제한하여 설계할 필요가 있으며, 용기와 대지사이의 외부과도파전압(FTO)를 저감시키기 위해서는 GIS의 외함을 각각 분할하여 제작할 필요가 있다.

끝으로 본 보고에서 기술한 것 이외에도 이 분야에 있어서 많이 남아 있는 연구과제에 대하여 활발한 연구가 이루어지길 기대한다.

참 고 문 헌

- 1) S.A. Boggs, F.Y. Chu and D. Schlicht: "Disconnect Switch Induced Transients and Trapped Charge in Gas-Insulated Substations", IEEE, Vol. PAS-101, No.10, 1982, pp.3593~3602.
- 2) N. Fujimoto, E.P. Dick, S.A. Boggs and G.L. Ford: "Transient Ground Potential Rise in Gas Insulated Substations", IEEE, Vol. PAS-101, No.10, 1982, pp.3603~3609.
- 3) A. Bargigia, G. Mazza, A. Bertazzi, W. Mosca and A. Pigni: "The Dielectric strength of SF₆ Configurations under Impulses Superimposed to DC Voltages", 5th ISH, Braunschweig, No.15, 1987.
- 4) T. Yamagiwa, T. Ishikawa, F. Endo, Y. Kamato: "Dielectric characteristics on Spacer Surface in SF₆ under Lightning Impulse Superimposed on AC Voltage", 5th, ISH, Braunschweig, 1987, Paper 13-03.
- 5) S. Nishiwaki, Y. Kanno, S. Sato, E. Haginomori, S. Yamashita and S. Yanabu: "Ground Fault by Restriking Surge of SF₆ Gas-Insulated Disconnecting Switch and Its Synthetic Tests", 5th, ISH, Braunschweig, 1987.
- 6) J. Meppelink, K. Diederich, K. Feser and W. Pfaff: "Very Fast Transients in GIS", CIGRE, 1988, Paper WM 114-1.
- 7) S. Kobayashi, Y. Yamagata, S. Nishiwaki, H. Okubo, Y. Kawaguchi, Y. Murakami and S. Yanabu: "Particle- Initiated Flashover Caused by Disconnecter Restriking Surge in GIS", 5th ISH, Braunschweig, 1987, Paper No. 12-03.
- 8) A. Pigni, G. Rizzi and A. Bargigia: "Fast Transient Over-voltages Generated by Disconnecter Operations in GIS", 5th ISH, Braunschweig, 1987, Paper No. 12-02.
- 9) K. Shiokawa and A. Takahashi: "Fast Transient Overvoltages Caused by Disconnecter Operation and The Method to Suppress Stresses on 1000KV Gas Insulated Switchgear", CIGRE No. 33.87, IWD 5-05, 1988.
- 10) 電氣協同研究會 絶縁設計合理化 専門委員會: "絶縁設計, 合理化", 電氣協同研究 Vol. 44, No.3, 1988, pp.97~173.
- 11) 永海捷司, 本間昭二, 中島昌俊, 森田公: "GIS用 断路器の 充電電流遮斷 サージに 影響な ちえる 諸因子", 5th ISH, Braunschweig, 1987.
- 12) 藤波秀雄, 宅間 董: "ガス絶縁断路器の 開閉時 サージと 絶縁特性", 5th ISH, Braunschweig, 1987.
- 13) CIGRE Working Group: "Very Fast Transient Phenomena Associated with Gas Insulated Substations", CIGRE, 1988, WG 33 / 13~09.
- 14) Dick E.P, Fusimoto N., Ford G.L. and Harvey S.: "Transient Ground Potential Rise in Gas-Insulated Substations-Problem Identification and Mitigation", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101, No. 10, October 1982.
- 15) Boeck W., Witzmann R.: "Main Influences on the Fast Transient Development in Gas-Insulated Substations (GIS)," Int. Symp. on the High Voltage Engineering (ISH), Braunschweig, 1987, Paper 12-01.

-
- 16) H. Fujinami, T. Takuma and Y. Aoshima: "Impulse Breakdown Characteristics in SF₆ Gas in the Presence of a Local Spark", IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-18, No.8, 1983, pp.429~435.
 - 17) G. Riquel and Z.Y. REN: "Insulating Behaviour of SF₆ Gaps Subjected to Fast Oscillating Over-voltages", IX Gas Discharge Conference, No. 14-05, October, 1988.
 - 18) H. Hiesinger and R. Witzmann: "Very Fast Transient Breakdown at a Needle Shaped Protusion", IX Gas Discharge Conf. No. 14-07, October, 1988.
 - 19) Boeck W., Taschener W., Gorablenkow J., Luxa G.F. and Menten L.: "Insulating Behaviour of SF₆ with and without Solid Insulation in case of Fas Transients", CIGRE-Report 15-07, 1986.
 - 20) T. Nitta, Y. Shibuya and Y. Fujiwara: "Voltage-Time Characteristic of Electrical Breakdown in SF₆", IEEE Tran. Vol. PAS-94, 1975, pp.108~115.
 - 21) L. Ullrich: "The Influence of Very Fast Transients on the Discharge Development in SF₆", IX Gas Discharge Conf. No. 14-06, October, 1988.
 - 22) N. Izeki: "Voltage-time Characteristics of SF₆ Gas", CIGRE Report No. 101. 1985, pp. 41~59.
-