

## 765 kV 계통의 송전선로 거리에 따른 HSGS 적용에 관한 연구

우정욱\*, 심응보\*, 김종화\*\*, 김범진\*\*  
 한전 전력연구원\*, 한국전력공사\*\*

### A analysis result on the application of HSGS to the 765 kV transmission line according to it's length

J.W.Woo\*, E.B.Shim\*, J.H.Kim\*\*, B.J.Kim\*\*  
 KEPRI\*, KEPCO\*\*

**Abstract** - The extended 765 kV system may have severe electrical transients according to the interconnection of transmission lines and have long transmission line over 250 km. So we need to analyze the transient phenomena to confirm the insulation coordination which is designed for 765 kV project step I.

In particular, this paper shows the analysis results of secondary arc extinction by HSGS (high speed ground switch) application. The EMTP/MODELS were used to simulation study of secondary arc phenomena.

We had confirmed the TRV(transient recovery voltage) and rated current of HSGS which will be used in the KEPCO 765 kV system.

## 1. 서 론

765 kV 증설계통은 동서 계통이 서로 연계가 되고 계통 구성이 더욱 복잡해짐에 따라, 발생되는 과전압도 더욱 가혹해질 가능성이 있으므로, 전력계통의 과도현상을 해석하여 현재의 절연설계 기준을 초과하는지의 여부를 검증하고 필요시 이에 대한 대책을 수립하기 위한 연구를 수행하였다.

그 중의 한 연구결과로, 다상재폐로를 하기 위하여 고속도절지스위치(HSGS)를 사용하는데 2차아크의 소호 작용시의 정격전류 및 고유과도회복전압을 검토하여 규격치 초과여부를 확인하였다.

EMTP/MODELS에 의한 2차아크 소호특성의 해석은, 고장차단 후 750 ms를 초과하지 않고 소호되는 것을 기준으로 설정하여, 기준시간 이내에 자연적으로 소호되거나 HSGS를 투입하여 소호되는 것을 확인하였다.

고장의 종류는 산불에 의한 송전선로 하단상의 후속고장을 고려하여 모의하였으며, 선로의 길이가 80 km 이하인 경우에는 편단에만 HSGS를 설치하여도 소호가 가능함을 확인하였다. HSGS의 정격을 재확인한 결과 기준의 검토결과와 큰 차이는 없었으나, 정격전류 8.0 kA에 비해 7.0 kA로 1 kA 정도의 여유가 있음을 확인하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 해석대상계통 및 해석조건

해석 대상 송전단 모선과 수신단 모선사이의 송전선로를 5구간으로 나누어서 모의하였다. 따라서, 송전선로 길이별 구간은 각각 다르다. 송·수전단의 등가 임피던스와 송전선 모델은 가장 최신자료로 수정하였으며, 모의시 지락의 위치는 각 상별 노드점을 만들어서 지락지점의 상을 결정할 수 있게 하였다.

2차 아크를 모델링하기 위한 기법은 EMTP-Models 기능을 사용하였으며, 고장상에 유기되는 전류에 대한 기준전류는 스위칭기능을 이용하여 전전상의 전류값을 읽어서 2차 아크 해석모델에 입력되도록 하였다. 기본적으로 해석모델은 "송배전선로 재폐로방식의 최적화 연구"에서 개발된 모델을 이용하였다.

## 2.2 해석결과

### 2.2.1 기준전류에 따른 영향 (100 km 기준)

사용된 EMTP의 MODELS의 routine에서 2차 아크의 지속상태를 모의하기 위하여 기준전류는 고장상의 다른 건전 두상의 전류가 각각 선택된다. 따라서, C상 고장시에 기준전류로 삼는 상이 A상일 때와 B상일 때가 결과값이 서로 상이하면 이후 해석시에 기준을 어떤 상으로 잡아야 할지가 문제로 대두된다. 여기서는 선로길이가 100 km이면서 80 km 지점에서의 사고시에 기준전류의 상태에 따른 영향을 검토하였다.

기준전류가 A상인 경우에는 769 ms, B상인 경우에는 760 ms 정도로 거의 차이가 없어서, 이후 검토시에는 편의상 B상을 기준으로 검토하기로 하였다.

### 2.2.2 선로길이/지락위치별 2차아크 지속시간

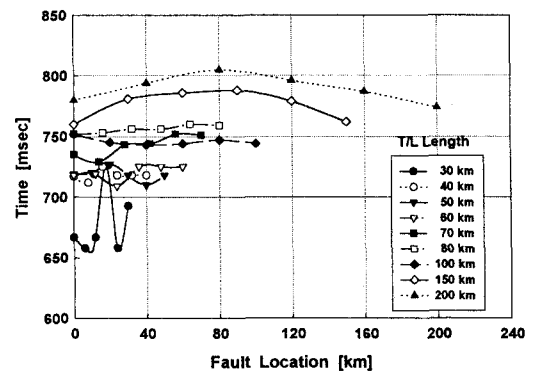


그림 1. 송전선로 길이별 2차 아크 지속시간 특성

그림 1은 30 km에서 200 km까지의 길이가 서로 다른 송전선로를 5등분하였을 때, 5등분된 각 위치에서 지락이 났을 경우 2차 아크의 지속 특성을 나타내고 있다. 산불을 기준으로, 고장은 하단암인 C상에서 나며, 고장이 난 지점의 건전상인 B상의 전류를 기준전류로 설정하였다.

전체선로를 등간격으로 나누었을 때 지락지점의 위치에 따른 2차 아크의 지속시간은 특정한 경향 없이 위치

별 서로 다른 특성을 보여주고 있다. 특히, 선로 길이가 30 km 경우에는 불균일한 경향을 보여주고 있다. 그 외의 선로에서는 선로길이가 같은 경우에는 비슷한 크기의 경향을 보여 주고 있다.

송전선로가 길어질수록 2차 아크의 지속시간이 길어지는 경향을 나타내고 있다. 선로길이가 70 km 이하에서는 750 ms 이내에서 2차 아크가 소호된다.

### 2.2.3 후속고장과 HSGS투입조건에 따른 영향

전체 송전선로의 길이 조건을 30~200 km까지 가변시켰으며, 선형 지락 위치와 후속 지락 위치는 전체 선로의 4/5 지점의 동일한 위치에서 발생한 경우에 대해서 검토하였다.

Case A는 2회선 선로중 첫 번째 선로의 가장 하단암인 C상에서 지락이 발생하여 1차 아크 발생후, C상의 선로의 양쪽 차단기가 4 Cycle(67 ms)에 open 되었을 때의 경우이다. 2차 아크는 모두 1 초안에 소호되고 있으며, 특히 70 km 이하의 송전선로에서는 750 ms 이하에서 2차 아크가 모두 소호되고 있다.

Case B는 Case A의 조건에서, 지락이 난 C상에 280 ms에 HSGS가 투입되어 750 ms에 HSGS가 open 되는 경우이다. 즉, 지락시의 HSGS 투입효과를 보기 위한 경우이다. 그림에서 보듯이 HSGS가 투입되는 280 ms에서 2차 아크는 완전히 소호되어 버린다. 따라서, HSGS는 효과적으로 고장상의 잔류전류를 소호시켜 버리고 있다.

Case C는 Case A의 조건에서, 타회선의 가장 하단암인 R상에서 후속 고장이 100 ms에 발생하여 후속 고장상의 양쪽 차단기가 150 ms에 open 되었을 경우이다. 즉, 후속고장이 일차 고장상인 C상의 2차 아크 전류에 미치는 영향을 살펴본 경우이다.

후속고장이 인근상에서 발생함으로 2차 아크전류의 지속시간은 모든 경우에서 약 100~150 ms 정도 길어지고 있으며, 1초 이내에는 모두 소호되나, 안전율을 고려하여 750 ms 이내를 목표 소호시간으로 본다면 모든 경우에서 2차 아크 소호시간이 750 ms를 초과한다.

Case D는 Case C와는 달리 후속 고장상의 양쪽 차단기가 150 ms에서 open 되지 않고 계속 들어가 있음으로 후속 고장 조건을 매우 가혹하게 설정하였다. 이 경우는 그림에서처럼 모든 경우에서 2차 아크 소호시간이 1초를 넘어가고 있다.

Case E는 Case C의 조건에서, 즉, 후속고장상인 R상의 양쪽 차단기가 150 ms에 open 되었을 경우이며, 일차 고장상인 C상에는 HSGS를 280~750 ms 동안 투입하였을 경우이다. 즉, 후속고장이 발생한 경우의 HSGS 투입 효과를 살펴 본 것이다. 후속 고장이 없었던 Case B와 마찬가지로 HSGS가 투입되는 280 ms에서 2차 아크는 완전히 소호되어 버려서, 후속 고장과의 상관없이 HSGS는 효과적으로 고장상의 잔류전류를 소호시켜 버리고 있다.

Case F는 Case D처럼 후속고장상인 R상의 양쪽 차단기가 open 되지 않고 계속 들어가 있는 가혹한 경우엔, 일차 고장상인 C상에 HSGS를 280~750 ms 동안 투입하였을 경우이다. Case D처럼 2차 아크는 1초 이내에 소호되지 않아서, 1초 이내에 고장상을 복구하려면 HSGS가 들어가 있는 750 ms 이내에 후속 고장상의 차단기가 open 되어야 한다.

따라서, 한상(C상)만의 고장을 고려한다면 70 km 이내의 짧은 선로에서는 HSGS가 필요없이 750 ms 이내에서 2차 아크가 소호되어 재투입 가능하다. 그러나, 후속 고장까지 고려한다면 선로길이에 무관하게 모든 경우에서 2차 아크 소호시간이 750 ms를 넘어섬으로 모든 선로에 HSGS를 달아야 한다.

선로길이가 40 km인 송전선로에서 HSGS가 한쪽만 투입되었을 때의 2차 아크 소호 시간을 살펴 보았다. 앞의 Case B와 E처럼 HSGS가 선로 양쪽 모두에 들어감으로 280 ms에서 2차 아크가 완전 소호된 경우와 같은 고장 조건에서, Case BR, ER는 전원단 Receiving End쪽(지락지점에서 먼 쪽)의 HSGS만 투입한 경우이고, Case BS, ES는 Sending End 쪽(지락지점에서 가까운 쪽)의 HSGS만 투입한 경우이다.

후속고장이 없는 경우와 후속 고장이 있는 경우 모두 지락지점에서 가까운 쪽의 HSGS가 투입되면 2차 아크가 빨리 소호되고, 반면 지락지점에서 먼 쪽 HSGS가 투입되면 약간의 시간차를 두고 500~600 ms에서 2차 아크가 소호된다. 따라서, 40 km 정도의 짧은 송전선로에서는 선로 양쪽중 한쪽에만 HSGS를 투입하여도 2차 아크는 750 ms 이내에서 소호된다.

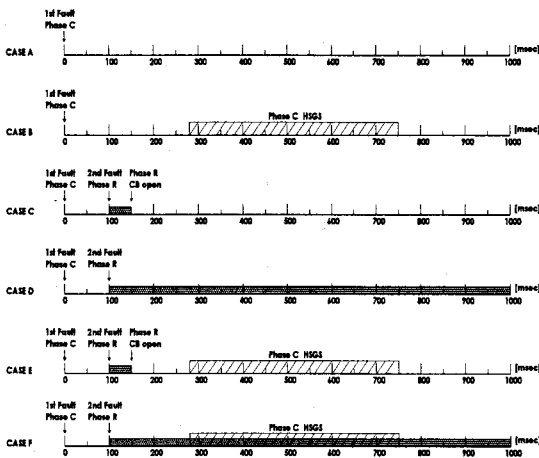


그림 2. EMTP Case Time Sequence

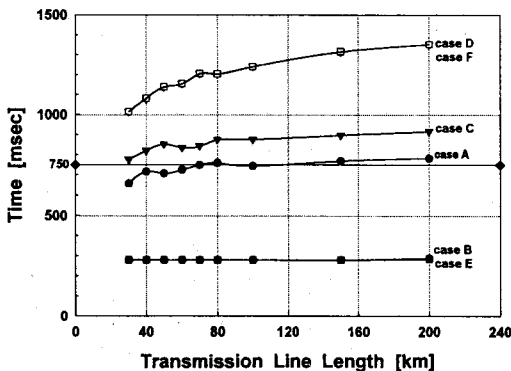


그림 3. EMTP 계산 결과

### 2.2.4 후속고장과 HSGS 투입에 따른 TRV특성

Case RN은 C상에 HSGS가 투입되기 전(100 ms)에 후속 고장이 나서 HSGS(280 ms)가 들어가기 전에 역시 R상의 차단기가 open(150 ms) 되는 경우이다. Case RE는 C상에 HSGS가 들어가기 이전(100 ms)에 후속 고장이 나서 HSGS가 들어가고(280 ms) 나서, R상의 차단기가 450 ms에 open 되는 경우이다.

Case RF는 C상의 HSGS가 280~750 ms 동안 들어가 있고, 후속 고장은 HSGS open 되기 이전인 700 ms에 발생하여 950 ms에 R상의 차단기가 open 되는 경우이다. Case RG는 C상의 HSGS가 280~750 ms 동안 들어가 있고, 후속 고장은 HSGS가 on 되기 이전

인 100 ms에 발생하여 R상의 차단기가 open 되지 않고 영구히 고장나는 가장 가혹한 경우이다.

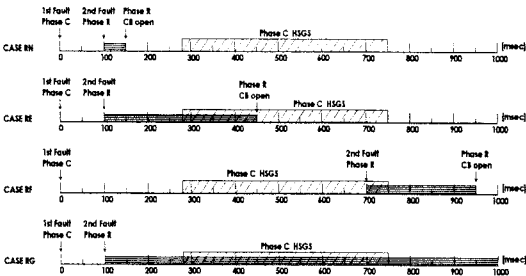


그림 4. EMTF Case Time Sequence

그림에서 보면, 후속 고장(R상)이 C상의 HSGS가 들어가기 전에 발생하여 영구히 고장 조건을 유지하면서 후속 고장상(R상)의 선로 양쪽 차단기가 들어가 있는 아주 가혹한 경우인 Case RG에서는 C상의 2차 아크전류가 1 초 이내에서 소호되지 않지만, Case RN처럼 C상의 HSGS 투입전에 후속 고장상의 차단기가 open 되어 있거나, Case RF처럼 C상의 HSGS가 투입된 후속 고장이 발생하더라도 C상의 2차 아크전류는 HSGS 투입과 동시에 소호되어 버린다.

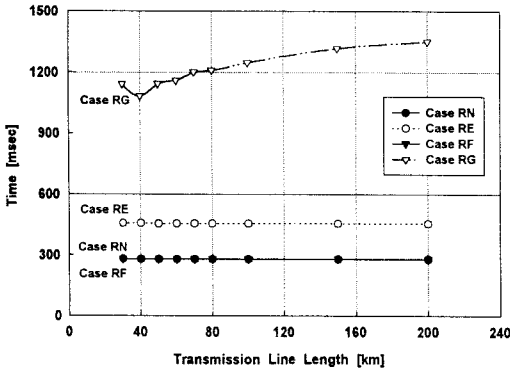


그림 5. 조건별 2차 아크 지속시간 특성

그림 5의 Case RE처럼 HSGS가 들어가 있는 동안에만 R상의 양쪽 차단기가 open된다면 R상의 차단기가 open되는 시점에서 2차 아크는 소호되어 버린다.

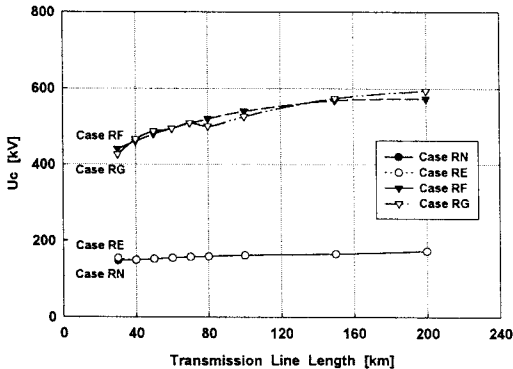


그림 6. HSGS의 TRV 특성 (Uc)

그림 6에서 보면, HSGS가 open 될 때 극간의 파괴치(Uc) 특성을 살펴보면 HSGS가 open 되기 이전에 후속 고장상의 차단기가 open 되어 고장조건이 완화된 경우인 Case RN, RE에서는 Uc가 200 kV를 넘지 못하나, HSGS가 open 되는 시점인 750 ms에 후속고장이 겹쳐져 있는 Case RF, RG에서는 Uc가 비교적 높아져서 최대 571 kV 정도가 된다.

HSGS가 open될 때 극간의 파괴치(Uc) 대 경과시간(dt)의 비인 상승률(RRRV)이 가장 가혹한 경우는 송전선의 길이가 30 km인 경우로, 고장지점이 수전단 모선에 가장 가까운 지점이며, 이때의 상대측 HSGS 극간에서의 상승률이 1.3 [kV/μs]이었다.

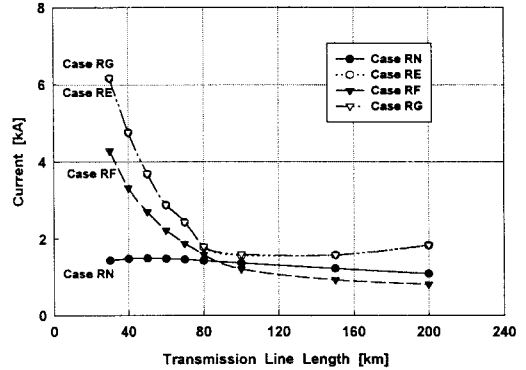


그림 7. HSGS로 흐르는 전류

HSGS로 흐르는 고장전류의 크기는 그림 7에서 보듯이, 후속 고장이 HSGS가 on 되는 시점과 겹쳐져서 발생하는 조건인 Case RG, RE 조건에서 가장 큰 값인 6.2 kA를 기록하고 있다.

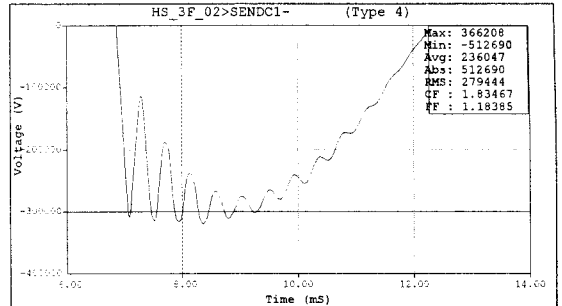


그림 8. HSGS의 TRV 특성 그래프

그림 8은 HSGS가 open될 때 극간의 상승률이 가장 가혹한 경우의 과도회복전압 파형이다.

### 2.2.5 단거리 선로의 HSGS 편단설치 효과 검토

765 kV 송전선로에 HSGS를 적용할 경우 중에서 송전선로의 길이가 80 km 미만의 비교적 짧은 경우에 HSGS를 한쪽단만 달았을 때의 HSGS 사용 효과에 대한 검토 결과이다.

검토 조건 중에서 송전선로의 길이는 40 km에서 80 km까지를 5 km 단위로 증가 시켰으며, 지락의 위치도 송전단과 수전단 양쪽에 각각 편중될 때 각 조건에서 HSGS가 송전단/수전단 각각에 달려 사고시 투입될 때 사고상의 2차아크가 소호되는 시간을 검토하였다.

고장은 C상에 일차 사고가 나고 후속고장이 R상에 100~150 ms동안 발생하여 HSGS는 280 ms에 투입된다. 지락의 위치가 송/수전단에 편중되어 각각 발생하고, 이때 HSGS도 송/수전단의 각각에 하나씩 선택적으로 투입하였을 경우이다.

### 3. 결 론

765 kV 송전선로에 HSGS 적용여부를 검토하기 위하여 EMTP의 MODELS 기능을 이용하여 2차 아크 소호특성을 각 선로의 길이별로 살펴보고, 또한, 후속고장에 의한 2차 아크 소호 특성도 살펴보았다.

또한, HSGS에 따른 영향과 HSGS의 TRV 특성, 전류의 크기 등도 살펴보았다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

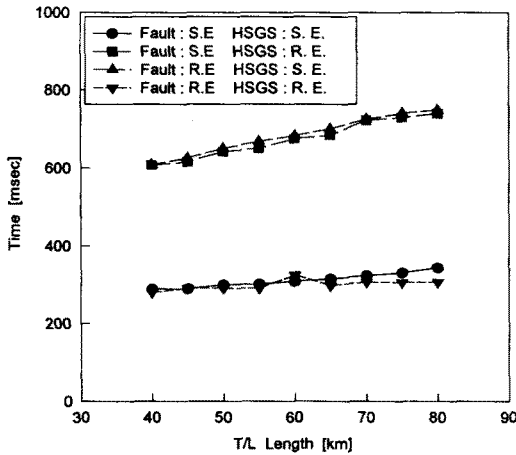


그림 9. 2차아크 지속시간 특성 (HSGS 편단 적용)

그림 9에서 보듯이 지락의 위치와 HSGS의 투입위치와의 상관관계를 살펴보면, 지락지점에서 가까운 쪽의 HSGS가 투입되면 2차 아크는 300 ms 부근에서 빨리 소호되어 버리고, 반면, 지락지점에서 먼 쪽에서 HSGS가 투입되면 약간의 시간차를 두고 600~750 ms에서 2차 아크가 소호된다.

사고발생은 어떠한 곳에서도 발생할 수 있음으로, 각각의 경우에서 2차 아크가 소호되는데 걸리는 시간이 가장 긴 경우를 살펴보면 가장 긴 선로인 80 km 송전선로일 때가 750 ms에서 2차 아크가 소호되어 가장 가혹한 조건이 되고 있다.

결론적으로, 80 km 정도의 짧은 송전선로에서는 선로 양쪽 중 한쪽에만 HSGS를 투입하여도 2차 아크는 750 ms 이내에서 소호됨을 확인하였다. 또한, HSGS의 설치위치는 송수전단에 상관없이 아무쪽이나 달아도 될 것으로 사료된다.

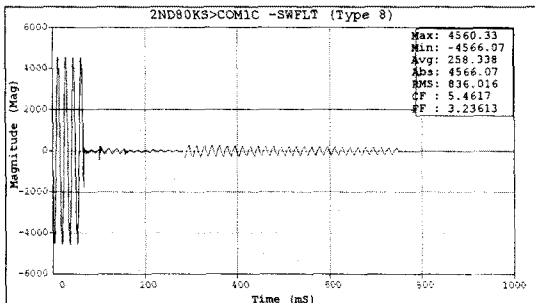


그림 10. 2차아크 지속파형/HSGS 편단적용, 80km

그림 10은 80 km 송전선로의 한 쪽에만 HSGS를 적용했을 때 2차 아크 지속특성 파형이다.

1. 후속고장이 없는 경우 HSGS를 투입하지 않고 750 ms 이내에 2차 아크가 자연 소호될 수 있는 송전선로의 한계 거리는 70 km 이내이다.

2. 1상의 후속고장을 고려한 경우는 2차 아크 지속시간이 750 ms 이상이므로 HSGS를 투입하여야 한다.

3. 80 km 이하의 짧은 송전선로에서는 선로 양쪽 중 한쪽에만 HSGS를 투입하여도 2차 아크는 750 ms 이내에서 소호됨을 확인하였다. 또한, HSGS의 설치위치는 송수전단에 상관없이 아무쪽이나 달아도 될 것으로 사료된다.

4. 해석결과를 기준으로 HSGS 규격(안)을 추천한 결과는 다음 표와 같다.

표 1. HSGS 규격 (안)

항 목	해석 결과	규격 (안)
차단전류 [kA]	6.2	7.0
TRV	상승률[kV/ $\mu$ s]	1.3
	파고치 [kV]	571

#### [참 고 문 헌]

- [1] EMTP Rule Book, ATP Salford Version, I, II, 1987
- [2] EMTP Primer, EPRI EL-4202, Project 2149-1, Final Report, September 1985
- [3] EMTP Workbook II, Switching Surge, The University of Wisconsin March, 1987
- [4] EMTP Case Study Workbook I~IV, Electrotek Concept, Inc, January 1997
- [5] 765 kV 계통 절연협조연구(최종보고서), 전력연구원, 1995. 12
- [6] 765 kV 송전선로 공기절연거리 실증연구(최종보고서), 전력연구원, 1996. 11
- [7] AEP 765-kV System Operating Guidelines, June 1975
- [8] UHV 送電系統の絶縁(絶縁部會報告書), 電力中央研究所, 1982
- [9] UHV送電特別委員會系統部會報告書(UHV交流送電系統の特性), 電力中央研究所, 1982
- [10] UHV送電特別委員會中間報告書(UHV交流送電에關する研究), 電力中央研究所, 1982
- [11] "송배전선로 재페로방식의 최적화 연구"(TR.95YJ 18.J1998.12)(1998.3.전력연구원)
- [12] Yutaka Goda, Shoji Matsuda, Tsuginori, Yuzo Ozaki, "Forced Extinction Characteristics of Secondary Arc on UHV(1000 kV Class) Transmission Lines", IEEE transaction on Power Delivery, vol. 8, pp. 1322~1330, July 1993.