

KRC-92T-J07

50

765kV 계통절연 협조연구

(최종보고서)

A Study on the Insulation Coordination
of 765kV System

MASTER

1995. 12.

DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED
FOREIGN SALES PERMITTED RB



전 력 연 구 원

DISCLAIMER

**Portions of this document may be illegible
in electronic image products. Images are
produced from the best available original
document.**

제 출 문

전력연구원장 귀하

본 보고서를 “765kV 계통절연 협조연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

1995. 12

전 력 연 구 원

한 국 전 기 연 구 소

765kV 송전기술팀

수석연구원 : 김 정 부

책임연구원 : 황 치 우

선임연구원 : 심 응 보

선임연구원 : 정 동 학

정 재 기

이 용 한

연구 원 : 우 정 욱

윤 재 영

요 약 문

1. 연구과제명

765kV 계통절연 협조연구

2. 연구개발기간

가. 총연구기간 : 1992.7. ~ 1995.12.

나. 위탁연구기간 : 1993.1. ~ 1995.10.

3. 연구개발목적 및 필요성

본 연구는 현재 국내 전력 수급난에 대처하기 위해 검토중인 계통전압 격상 계획에 따른 차기 전력계통(공칭전압 765kV)의 절연설계 및 절연협조에 관한 연구로서 계통 전압이 높아지게 되면 이에 따른 절연비용은 급격히 상승하며, 국내 전력계통의 근간계통을 구성하게 되므로 전력공급 신뢰도 요구가 매우 높아지게 된다. 따라서 효과적인 과전압 억제 대책을 통한 합리적인 절연설계 및 절연협조 방안이 반드시 마련되어야 한다.

그런데 국토가 협소하고 산지가 많은 우리나라의 여건상 765kV 급에서는 그 유례가 없는 수직배열 2 회선 선로의 적용이 요구됨에 따라 765kV 급 전력계통을 기운용중인 외국의 전력계통과는 철탑의 형태는 물론 계통 구성도 상당히 다르게 될 것으로 예상되며, 이에 따라 계통에 발생하는 각종 현상도 상이할 것으로 사료된다. 따라서 외국의 설계 데이터를 그대로 적용하기에는 상당한 어려움이 따르고 정확한 설계 제원을 얻을 수 없으므로 우리계통 고유의 과전압 현상

을 검토하지 않으면 안된다.

본 연구에서는 차기 전력계통의 특성을 고려하여 계통에 발생가능한 일선지락 일시파전압, 투입, 재투입, 지락 및 차단 켜어지고 변전소내 뇌파전압 등 각종 파전압 발생 양상을 면밀히 검토하고, 외국의 예를 참조하여 국내 여건에 적합한 계통 절연협조 및 절연설계를 달성하고자 한다.

4. 연구내용 및 범위

가. 송전선로의 상용주파 일시파전압 해석

- 대상 계통 선정
- 일선지락 일시파전압 해석
- 상용주파 일시파전압 배수(안) 선정

나. 송전계통의 개폐파전압 해석

- 대상 계통 선정
- 지락켜어지 해석
- 투입 및 재투입 켜어지 해석
- 차단켜어지 해석
- 송전선로 및 변전소에서의 개폐파전압 배수(안) 선정

다. 가스절연변전소내 뇌파전압 해석

- 대상 변전소 선정
- 변전소내 뇌파전압 발생 양상 검토

라. 송전선로 절연설계(안) 검토

- 송전선의 뇌사고율 검토
- 송전철탄 절지저항 및 차폐각 검토
- 애자 및 공기절연거리 검토
- 송전선로의 절연설계(안) 도출

마. 가스절연변전소 절연협조 검토

- 피뢰기 정격 및 설치위치(안) 선정
- 가스절연변전소 개폐임펄스내전압(안) 선정
- 변전소내 주요 기기의 기준절연강도(안) 선정

바. 과도회복전압 및 고속접지개폐기 검토

- 차단기의 과도회복전압 발생 양상 검토
- 고속접지개폐기의 차단전류 및 과도회복전압 검토
- 고속접지개폐기의 영점추이현상 검토

5. 연구개발 결과 및 활용에 관한 건의

가. 연구결과

- 송전선로의 상용주파 일시과전압 배수(안)

대 상	일시과전압 배수 [p.u]	비 고
상 도 체	1.2	일선지락 일시과전압 배수
중 성 점	0.3	변압기 중성점 개방 운전시

- 송전계통의 개폐과전압 배수(안)

개폐과전압 배수(안) [p.u]			조 건
선로	상대지간	1.9	• 투입저항 1,000 [Ω] 이하 적용 • 2선지락 2상차단까지 고려
	선간	3.5	
변전소	상대지간	1.8	• 저항투입실패시 재투입과전압
	선간	3.5	

구분				공기결연거리 [mm]	
표고		아킵톤 간격		1,000 m	1,300 m
표준결연간격		아킵톤 간격		5,380	5,000
최소결연		도체~하단암	4,530	4,650	
간격		도체~탑체	4,900	5,040	
이상지 결연간격		이상지 결연간격		1,850	1,930
상간 결연간격		상간 결연간격		8,420	8,640

* 현수 애자 기준

- 승전철타 공기결연거리(안)

애자 종류		애자수 [개]		호간격 [mm]	
표고	1,000 m	1,300 m	1,000 m	1,300 m	
	300 kN		현수	30	4,800
	400 kN		현수	29	4,800
			내장	28	4,600
	500 kN		내장	24	4,600

- 청정 I 지역 소요애자수량 및 아킵톤 간격(안)

- 송전선 내뢰설계(안)

항 목		내뢰설계	
연간뇌우일수		20 일/년	
가공지선 Arm 길이		최외측 전력선 암보다 1 m 길게 (차폐각기준 -8° 이상)	
철탑접지저항		15 Ω	
섬락경로		현수장치	내장장치
		애자런 혼	점퍼 혼
혼 간격		4,800 mm	4,600 mm
표 준	적용방법	1.115*Z + 21 (Z : 아킹혼 간격 [mm])	
절연간격	이격거리	현수철탑	내장철탑
		5,380 mm	5,150 mm

- 피뢰기 정격전압(안)

계통공칭전압 [kV]	계통최고전압 [kV]	피뢰기 정격전압 [kV]	비 고
765	800	576	IEC 선정방법
		144	변압기 중성점용

- 피뢰기 공칭방전전류 및 방전등급(안) 도출

용 도	공칭방전전류(안)	선로방전등급(안)
상도체용	20 kA	4
중성점용	10 kA	1

- 피뢰기 보호특성(안) 도출

종 류	급 준 파 제한전압	뇌 임펄스 보호레벨	개폐 임펄스 보호레벨
576 kV, 20 kA (상도체용)	1,440 kV	1,310 kV	1,200 kV
144 kV, 10 kA (중성점용)	343 kV	312 kV	248 kV

- 변전기기의 기준절연강도(안) 선정

종 류		표준 내전압 [kV]
개폐 임펄스		1,425(1,500*)
뇌 임펄스	변압기	2,050*
	모선 및 스위치 기어부	2,250
	고속접지스위치	2,250
* () 내의 값은 변압기, 변압기는 ANSI 규격을 따라 선정		

- 고유과도회복전압 해석 결과

고장종류	TRV 파라미터	최대값
3 선지락	파고치 [kV]	1,650
	상승률 [kV/μs]	4.4
1 선지락	파고치 [kV]	1,319
	상승률 [kV/μs]	3.6

- 고속접지개폐기의 차단전류 및 과도회복전압(안) 선정

항 목		특 성 값(안)
차 단 전 류 [kA _{rms}]		8
고유과도	상승률 [kV/μs]	1.30
회복전압	파고치 [kV]	600

- 고속접지개폐기의 영점추이현상 검토

- 1) 후속고장발생 및 차단시 영점추이현상 발생이 가능하다.
- 2) 다음 사항에 대한 면밀한 검토가 계속되어야 한다.
 - 영점추이현상 발생 확률 (영점추이기간과의 상관관계 포함)
 - 강제 영점 생성 방법
 - 복합 고장시 재투입 시퀀스

나. 활용방안

- 하위 계통의 절연협조 및 설계 기술 향상
 - ← 절연협조 및 설계 기술 확대 적용
- 관련 규격의 수정, 보완, 제정을 위한 근거자료 확보
- 각종 전력기기의 국산화를 위한 기초자료 제공

1. The first part of the document is a list of the names of the persons who have been appointed to the various offices of the city government. The names are listed in alphabetical order, and each name is followed by the name of the office to which he or she has been appointed.

2. The second part of the document is a list of the names of the persons who have been appointed to the various offices of the city government. The names are listed in alphabetical order, and each name is followed by the name of the office to which he or she has been appointed.

3. The third part of the document is a list of the names of the persons who have been appointed to the various offices of the city government. The names are listed in alphabetical order, and each name is followed by the name of the office to which he or she has been appointed.

4. The fourth part of the document is a list of the names of the persons who have been appointed to the various offices of the city government. The names are listed in alphabetical order, and each name is followed by the name of the office to which he or she has been appointed.

5. The fifth part of the document is a list of the names of the persons who have been appointed to the various offices of the city government. The names are listed in alphabetical order, and each name is followed by the name of the office to which he or she has been appointed.

6. The sixth part of the document is a list of the names of the persons who have been appointed to the various offices of the city government. The names are listed in alphabetical order, and each name is followed by the name of the office to which he or she has been appointed.

7. The seventh part of the document is a list of the names of the persons who have been appointed to the various offices of the city government. The names are listed in alphabetical order, and each name is followed by the name of the office to which he or she has been appointed.

8. The eighth part of the document is a list of the names of the persons who have been appointed to the various offices of the city government. The names are listed in alphabetical order, and each name is followed by the name of the office to which he or she has been appointed.

9. The ninth part of the document is a list of the names of the persons who have been appointed to the various offices of the city government. The names are listed in alphabetical order, and each name is followed by the name of the office to which he or she has been appointed.

10. The tenth part of the document is a list of the names of the persons who have been appointed to the various offices of the city government. The names are listed in alphabetical order, and each name is followed by the name of the office to which he or she has been appointed.

SUMMARY

1. Title

A Study on the Insulation Coordination of 765kV System

2. Period of the Study

A. Period of the Total Study : 1992.7. ~ 1995.12.

B. Period of the Entrusted Study : 1993.1. ~ 1995.10.

3. Object and Necessity of the Study

To meet increasing power demand, the 765kV transmission systems are under consideration. As the power system voltage becomes higher, the cost for power system insulation is much more increased. The 765kV transmission systems become the basis of power systems, and they have to have much higher reliability of the 765kV systems. Consequently by the methods to limit overvoltages effectively, the reasonable insulation design and coordination have to be accomplished.

The first object of this study is the analysis of the transients on the 765kV transmission systems. We will examine temporary overvoltages, switching surges and lightning phenomena. We will accomplish the reasonable insulation design and coordination of the 765kV transmission systems.

4. Contents and Scope of the Study

A. Analyses of the Temporary Overvoltages

- Single Line-to-Ground Fault Analyses
- Recommendation of Temporary Overvoltage Factor

B. Analyses of Switching Surges

- Fault Surge Analyses
- Closing Surge Analyses
- Opening Surge Analyses
- Recommendation of Switching Overvoltage Factor

C. Analyses of Lightning Surges

- Examination of the Lightning Overvoltages in GIS

D. Insulation Design of 765kV Overhead Transmission Line

- Insulation Design for Contamination
- Insulation Design for Switching Surges
- Insulation Design for Lightning

E. Insulation Coordination of GIS

- Ratings and Location of Lightning Arrester
- Switch Impulse Withstand Voltage
- Lightning Impulse Withstand Voltages

F. TRV and High Speed Grounding Switch

- TRV of Circuit Breakers
- Ratings of High Speed Grounding Switch
- Zero-Missing Phenomena of High Speed Grounding Switch

5. Results of the Study and Suggestion for Application

A. Results

- Recommended Temporary Overvoltage Factors

Item	Factor [p.u]	Note
Phase	1.2	SLG Fault
Neutral	0.3	Isolated Neutral

- Recommended Switching Overvoltage Factors

Recommended [p.u]			Conditions
Line	P-G	1.9	• Closing $R \leq 1,000 [\Omega]$
	P-P	3.5	• 2 Line Fault - 2 Line Open
S/S	P-G	1.8	• Reclosing Overvoltages
	P-P	3.5	Without Closing Resistor

- Recommended insulator design for clean area I

Kind of Insulator		Number of Insulators		Horn Gap Length	
		Altitude		1,000 m	1,300 m
300 kN	Suspension	30	31	4,800	5,000
400 kN	Suspension	29	29	4,800	5,000
	Tension	28	28	4,600	4,600
500 kN	Tension	24	24	4,600	4,600

- Recommended Tower Clearance

Description		Clearance [mm]	
		Altitude	
		1,000 m	1,300 m
Horn Gap Length		4,800	5,000
Standard Air Gap Length		5,380	5,600
Minimum Air Gap Length	Conductor~Lower Arm	4,530	4,650
	Conductor~Tower	4,900	5,040
Phase-to-Phase Distance		8,420	8,640
* For suspension string			

- Recommended insulation design of transmission line against lightning

Items		Insulation Design	
IKL		20 days/year	
Length of Arm for		$\geq$ (Arm Length for outer most phase conductor	
Tower Footing R.		15 Ω	
Flashover Path		Suspension	Tension
		Horn for String	Horn for Jumper
Horn Gap Length		4,800 mm	4,600 mm
Standard	Method	$1.115 \cdot Z + 21$ (Z : Horn Gap [mm])	
Air Gap Length	Length	Suspension	Tension
		5,380 mm	5,150 mm

- Recommended Voltage Rating of Lightning Arresters

Nominal	Maximum	Voltage Rating	Note
765 kV	800 kV	576 kV	
		144 kV	for Neutral

- Recommended Ratings of Lightning Arresters

Use for	Nominal Discharge Current	Discharge Class
Phase	20 kA	4
Neutral	10 kA	1

- Protective Characteristics of Lightning Arresters

	Residual Voltage	Lightning	Switching
576 kV, 20 kA	1,440 kV	1,310 kV	1,200 kV
144 kV, 10 kA	343 kV	312 kV	248 kV

- Recommended Withstand Voltages

Item		Std. Withstand Voltage kV
Switching Impulse		1,425(1,500*)
Lightning Impulse	Transformer	2,050*
	GIS Bus and Switchgear	2,250
	High Speed Grounding Switch Shunt Reactor	2,250
* () : ANSI Standard for Power Transformer Insulation		

- Results of PTRV Analyses

Fault Type	Parameter	Max. Value
3 Line to Ground	Peak [kV]	1,650
	Rate-of-Rise [kV/ μ s]	4.4
1 Line to Ground	Peak [kV]	1,319
	Rate-of-Rise [kV/ μ s]	3.6

- Breaking Current and TRVs of High Speed Grounding Switch

Item		Recommended Value
Breaking Current [kA _{rms}]		8
PTRV	Rate-of-Rise [kV/ μ s]	1.30
	Peak [kV]	600

- Zero-Missing Phenomena of High Speed Grounding Switch

- 1) The zero-missing phenomena can be caused by consecutive faults.
- 2) For the reasonable application of high speed grounding switch, further examination should be accomplished as follows :
 - Statistical Study on the Zero-Missing Phenomena
 - Countermeasure Against the Zero-Missing Phenomena
 - Reclosing Sequence When Consecutive Faults occurred

B. Suggestion for Applications

- Improvement of the Insulation Design and Coordination of the Existing Power Systems
- Basic Data for Amendment, Supplement and Establishment of Relative Standards
- Basic Data for Design of Power System Apparatus

목 차

제 1 장 서 론	21
제 2 장 765kV 계통의 상용주파 일시과전압	23
제 1 절 검토 조건	24
1. 대상 계통	24
2. 해석 범위 및 종류	24
3. 기기 모델 및 정수	24
제 2 절 765kV 계통의 일시과전압 배수(인)	27
제 3 절 765kV 송전계통의 일시과전압 발생양상	28
1. 고장상에 따른 일선지락 일시과전압	28
2. 선로 보상도에 따른 일선지락 일시과전압	28
3. 345 kV 등가 계통의 영향	30
4. 발전기 운전 대수의 영향	30
5. 선로 운전 회선수의 영향	31
6. 고장 임피던스의 영향	33
7. 2 선지락 고장시 건전상 전위상승	34
8. 변압기 중성점 전위상승	34
제 3 장 765kV 계통의 개폐과전압	36
제 1 절 해석 대상 계통 및 모의 방법	36
1. 송전 선로	36
2. 전원 모델	37
3. 지락 저항	37

4. 차단기 투입 및 차단 조건	37
제 2 절 개폐 과전압 배수(안)	38
제 3 절 각종 개폐 켜이지의 발생 양상	39
1. 지락 켜이지	39
2. 투입 및 재투입 켜이지	44
3. 차단 켜이지	49
4. 발생 원인별 개폐과전압 비교	52

제 4 장 765kV 가스절연 변전소의 노파전압	53
----------------------------	----

제 1 절 대상 변전소 및 해석 조건	53
1. 뇌격 침입 조건	54
2. 변전소 구성 조건	57
3. 기기류의 모의	60
4. 해석 기준	61

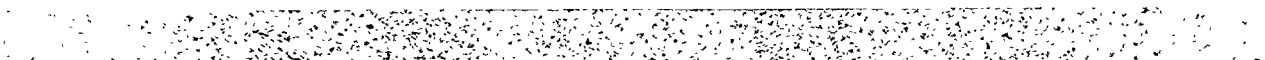
제 2 절 해석 결과	62
1. 피뢰기 설치위치(안)	62
2. 최대 발생 노파전압 설계치(안)	64

제 3 절 가스절연 변전소내의 노파전압 발생 양상	65
1. 2상 모델 도출	65
2. 선로 인입부의 피뢰기 설치위치	66
3. 모선 보호용 피뢰기의 설치위치	70
4. 변압기 보호용 피뢰기의 설치위치	76
5. 뇌격 전류의 크기 및 파형의 영향	80
6. 피뢰기 특성의 영향	82
7. 탑각 저항의 영향	85

8. 가스절연모선 써어지 임피던스의 영향 -----	86
9. 교류 전압 중첩의 영향 -----	88
10. 철탑 경간의 영향 -----	90
11. 발생 뇌과전압의 파두장 -----	91
제 4 절 결과 검토 -----	93
제 5 장 765kV 송전선로의 절연설계 -----	95
제 1 절 상용주파 일시과전압에 대한 절연설계 -----	96
1. 개 요 -----	96
2. 765kV 송전선로의 상용주파 과전압 절연설계 -----	97
제 2 절 개폐과전압에 대한 절연설계 -----	102
1. 개 요 -----	102
2. 765kV 송전선로의 뇌과전압에 대한 절연설계 -----	103
제 3 절 뇌과전압에 대한 절연 -----	112
1. 개 요 -----	112
2. 765kV 송전선로의 뇌과전압에 대한 절연설계 -----	114
제 4 절 765kV 송전선로의 절연설계 -----	118
1. 절연설계 일반사항 -----	118
2. 혼간격 및 소요 애자수량 산출 -----	119
3. 횡진각 및 소요 공기절연거리 산출 -----	125
제 6 장 765kV 가스절연 변전소 절연협조 -----	132
제 1 절 765kV 계통용 피뢰기 정격 선정 -----	132
1. 피뢰기 정격전압(안) -----	133
2. 공칭방전전류 및 방전등급(안) -----	134

3. 피뢰기의 보호특성(안)	140
제 2 절 765kV 가스절연 변전소의 절연강도 선정	142
1. 대표 과전압 선정	142
2. 협조 내전압 선정	142
3. 정격절연강도(안) 선정	144
4. 피뢰기의 보호특성과 정격절연강도와의 상관관계	144
제 3 절 765kV 용 변압기의 중성점 절연	145
제 7 장 고유과도회복전압 및 고속접지개폐기	147
제 1 절 고유과도회복전압	147
1. 정의 및 중요성	147
2. 고유과도회복전압 규격 관련사항	151
3. 765kV 계통 과도회복전압 검토	155
제 2 절 765kV 송전계통의 고속접지개폐기	173
1. 고속접지개폐기의 동작흐름도	173
2. 해석 조건	175
3. 고속접지개폐기의 차단전류 및 과도회복전압(안)	176
4. 고속접지개폐기의 차단전류 및 과도회복전압 발생 양상	176
5. 고속접지개폐기의 영점추이현상	189
제 8 장 결 론	200
참고문헌	202
부록 1. 절연협조 관련 용어 정의 및 순서 (IEC 71-1 기준)	207
부록 2. 상용주파 일시과전압에 대한 절연설계	219

부록 3. 개폐과전압에 대한 절연설계 자료 -----	241
부록 4. 뇌과전압에 대한 절연설계 자료 -----	271
부록 5. D/d 에 대한 혼간격 및 애자수량 산출방법 -----	307
부록 6. 애관, 붓싱의 규격 및 오손특성 -----	315
부록 7. 변전소 차폐의 검토 -----	337
부록 8. GIS 의 크기와 선로정수 -----	351
부록 9. 가공지선 창출길이 참고자료 -----	357



제 1 장 서 론

본 연구는 현재 국내 전력 수급난에 대처하기 위해 검토중인 계통전압 승압계획에 따른 차기 전력계통(공칭전압 765kV)의 절연설계 및 절연협조에 관한 연구로서, 계통전압이 높아지게 되면 이에 따른 절연 비용이 급격히 상승하게 될 뿐만 아니라, 국내 계통의 근간을 형성하게 되므로 사고파급 효과도 매우 클 것으로 예상된다. 따라서 적절하고 효과적인 과전압 억제 대책을 통한 합리적인 절연설계 및 절연협조에 의해 차기 전력계통의 높은 절연 신뢰도를 반드시 확보하여야 한다.

송전계통의 합리적인 절연설계 및 절연협조를 달성하기 위해서는 먼저 대상 계통의 각종 과전압 발생 양상의 면밀한 해석 및 검토가 반드시 수행되어야 하므로, 본 연구에서는 차기 전력계통에 발생가능향 각종 과전압을 해석하고 이를 토대로 송전선로 및 변전소의 절연설계 및 절연협조(안)을 도출하였다.

제 2 장에는 송전계통에 발생하는 지락사고에 의한 건전상의 전위상승을 검토하여 송전선로의 상용주파 내전압 설계 및 피뢰기 정격전압 선정에 가장 기본적인 자료가 되는 상용주파 일시과전압 배수(안)을 선정하였다

제 3 장에서는 송전계통의 각종 스위치류의 개폐 및 지락고장에 의한 개폐과전압 발생 양상을 검토하여, 송전선로 절연설계를 위한 개폐과전압 배수(안) 및 개폐써어지에 대한 변전소 절연협조를 위한 개폐과전압 배수(안)을 제시하였으며, 투입저항에 의한 개폐써어지 억제 효과에 대해서도 검토하였다.

제 4 장에서는 변전소의 합리적인 절연설계 및 절연협조 달성의 근간이 되는 변전소내 뇌과전압 발생 양상에 대한 검토를 수행하였으며, 현재 대상 변전소의 구성 및 기기배치가 확정되어 있지 않으므로, 여러가지 가변 요인을 고려하여 검토하였다.

제 5 장에서는 송전선로에서의 과전압 발생양상 해석 결과를 토대로 송전철탑 및 애자 설계(안)에 대해 기술하였으며, 제안된 송전선로에서의 뇌사고율도 함께 검토하였다.

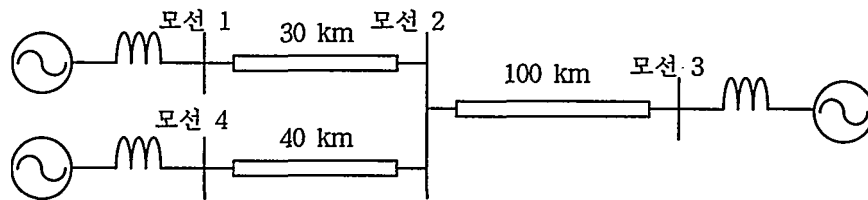
제 6 장에서는 앞서 검토한 각종 과전압 해석 결과를 토대로 가스절연 변전소에 대한 절연협조(안)을 제시하였는데, 송전계통 절연협조의 기본이 되는 피뢰기 정격 사항 및 각종 기기별 기준절연강도(안)에 대해서 기술하였다.

제 7 장에서는 추가 검토사항으로서 차기 계통에 발생하는 고유과도회복전압 및 고속접지개폐기 동작에 따른 과도적인 현상에 대한 검토 내용을 기술하였다.

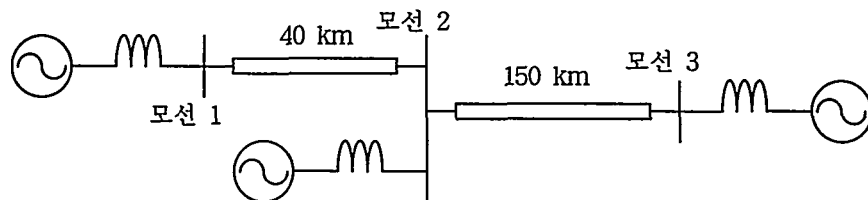
제 2 장 765kV 계통의 상용주파 일시과전압

전력계통에 발생하는 상용주파 일시과전압 발생원인으로는 지락고장, 부하급변 등이 있으며, 이러한 상용주파 일시과전압은 오손의 영향을 많이 받는 송전선로절연물의 절연특성에 매우 큰 영향을 끼치게 되며, 전력기기를 써어지에 대해 보호하기 위한 피뢰기의 정격결정에 가장 중요한 요인으로 작용된다. 따라서 효과적이고 합리적인 송전선로 절연설계 및 적정 피뢰기 정격 선정을 위해서는 발생가능한 상용주파 일시과전압에 대한 면밀한 검토가 선행되어야 한다.

통상, 지락 고장에 의한 건전상의 전위상승은 대칭좌표법을 이용하여 간단히 계산할 수 있으나, 765kV 송전선로의 비연가성 및 2회선 상호간의 영향을 고려하기 곤란하므로, 여기에서는 범용 전력계통 과도현상 해석 프로그램인 EMTP (Electro-Magnetic Transients Program)를 이용하여 지락 고장시의 건전상 전위상승에 대해 검토한 내용을 기술하였다.



(가) 모델 계통 1



(나) 모델 계통 2

그림 2.1 상용주파 일시과전압 해석용 모델 계통

제 1 절 검토 조건

1. 대상 계통

상용주파 일시과전압 해석을 위한 모델계통을 <그림 2.1>에 나타내었다.

2. 해석 범위 및 종류

765kV 송전계통의 상용주파 일시과전압 배수를 선정하기 위한 해석 범위는 다음과 같이 선정하였다.

- 일선지락 일시과전압
- 2선지락 일시과전압
- 변압기 중성점 접지 여부에 따른 변화

3. 기기 모델 및 정수

모델 계통은 송전선로, 단권 변압기 및 전원부로 구성되어 있으며, 각 구성요소 모델 및 사용 정수는 다음과 같다.

가. 전원부

<그림 2.1>의 모델 계통에서 전원부 모델은 발전소 및 등가 전원 2가지로 분류되는데, 발전소는 발전기, 송압용 변압기 및 765kV 주변압기의 구성을 상정하였으며, 발전기 및 송압용 변압기는 다음 정수를 이용하여 정전압원과 등가 인덕턴스로 표현하였다.

- 발전기 정수
 - 용량 (1 기당) : 500 MVA
 - 출력전압 : 22 kV

- 차과도 임피던스 : 20 % (자기용량 기준)
- 최대 운전 기수 : 10 기
- 승압용 변압기 정수
 - 용량 (1 뱅크당) : 500 MVA
 - 결선방식 : Δ - Y(접지)
 - 변압비 : 22/345 kV
 - % 임피던스 : 10 % (자기용량 기준)

발전소가 아닌 일반 전력계통망의 등가화는 단락용량 데이터를 이용하여 등가 임피던스로 모의하였다.

나. 765kV 단권 변압기

765kV 변압기는 3차권선을 갖는 단권 변압기를 상정하였으며, EMTP에는 단권 변압기를 직접 표현할 수 있는 모델이 없으므로, 이를 <그림 2.2>와 같이 3권선 변압기로 등가화하여 표현하여야 하며, 사용된 단권 변압기 정수는 다음과 같다.

- 용량 : 2,000 MVA $\times$ 4 뱅크
- 결선방식 : Y(접지) - Y(접지) - Δ
- 변압비 : 765/345/22.9
- % 임피던스 (2,000 MVA 기준, 1 뱅크) : 10 %

단권변압기를 3 권선변압기로 변환하기 위한 조건식은 다음과 같다. (부호는 <그림 2.2> 참조)

- $V_1 = V_H - V_L$
- $V_2 = V_L$
- $V_3 = V_T$

- $Z_{12} = Z_1 + Z_2 = Z_{HL} (V_H/V_1)^2$
- $Z_{23} = Z_2 + Z_3 = Z_{LT}$
- $Z_{13} = Z_1 + Z_3 = Z_{HL} V_H V_L/V_1^2 + Z_{HT} V_H/V_1 - Z_{LT} V_L/V_1$

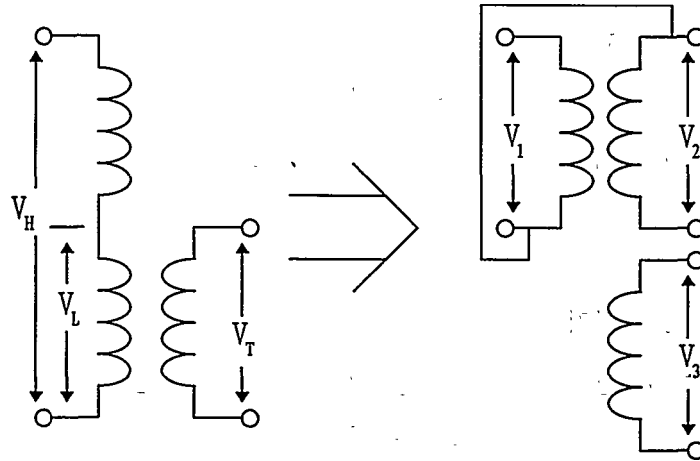


그림 2.2 단권변압기의 3 권선 변압기로의 등가화

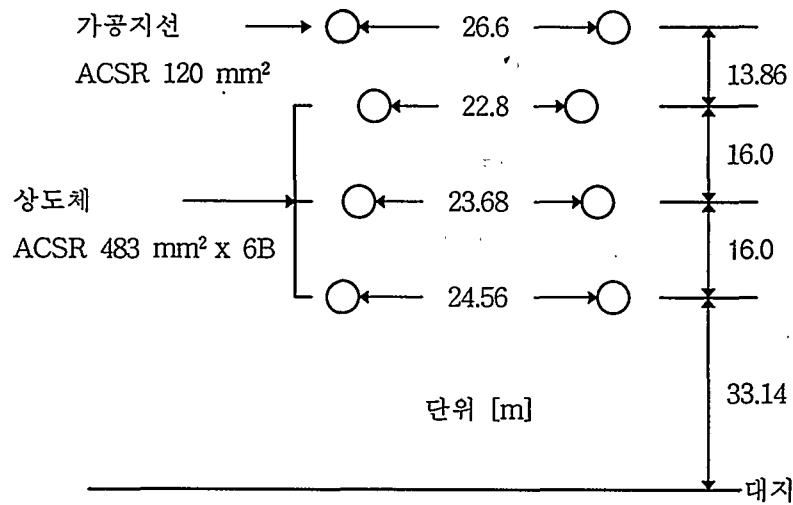
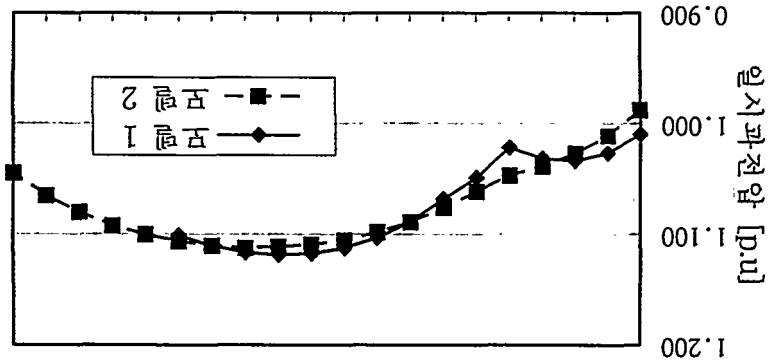


그림 2.3 철탑에서의 도체 배치 및 구성

그림 2.4 765kV 계통에서의 임선지락 임시과전압
측정위치(모선 2로부터의 거리, km)



대 상	임시과전압 배수 [p.u]	비 고
상 도 계	1.2	임선지락 임시과전압 배수
응 성 점	0.3	변압기 응성점 개방 운전시

표 2.1 765 kV 송전계통의 상용주파 임시과전압 배수(안)

해석 대상 계통(모델 계통)에서의 지락고장시 전전압 전위상승을 해석한 결과
를 토대로 국내 765kV 송전계통의 상용주파 임시과전압 배수(안)를 <표 2.1>에
나타내었으며, 대표적인 해석 결과를 <그림 2.4>에 도시하였다.

제 2절 765kV 계통의 임시과전압 배수(안)

765kV 송전선로는 첩담에서의 도체구성이 <그림 2.3>과 같은 계획 도체를 사
용하여 EMTTP의 비연가 분포 정수 모델로 표현하였으며, 경부하시 혹은 무부하
시 선로 충전용량을 보상하기 위한 분포 리액터는 선로 시단과 말단에 나누어서
설치한 것으로 하였다. 분포 리액터에 의한 선로 충전용량의 보상 정도는 60 ~
100 % 에 대하여 검토하였다.

다. 765kV 2 회선 비연가 충전선로

제 3 절 765kV 송전계통의 일시과전압 발생양상

송전계통의 지락고장시 전전상의 전위상승은 고장점(일선지락 고장 발생 지점)에서의 대칭 성분 임피이던스에 의해 계산할 수 있다. 모델 계통에서의 등가 대칭 성분 임피이던스는, 등가 전원 임피이던스와 선로 임피이던스로 부터 구해지는데, 각 모선에서의 고장계산에 의해 도출되는 등가 전원 임피이던스는 발전용량, 변압기 운전 벡크수 및 345kV 계통 조건 등에 따라 달라지게 된다. 여기에서는 고장점에서 본 대칭 성분 임피이던스의 여러 결정 요인들의 변화에 대한 일시과전압 해석 결과에 대해 기술하였다.

1. 고장상에 따른 일선지락 일시과전압

765kV 송전선로는 높은 계통전압으로 인해 연가가 매우 곤란하므로 통상 비연가로 운전되는데, 비연가 선로에서의 지락 고장에 의한 전전상의 전위상승은 선로 임피이던스의 불평형으로 인해 고장상에 따라 다르게 나타난다.

<그림 2.5>에 고장상에 따른 일선지락 일시과전압 해석 결과를 도시하였다. 모델 계통에서는 하위상 고장시에 중간상의 전위상승이 가장 높게 발생되었으며, 비연가에 의한 차이는 최대 0.025 [p.u.] 까지 나타났다.

2. 선로 보상도에 따른 일선지락 일시과전압

<그림 2.6>에 선로 보상도에 따른 일선지락 일시과전압 변화를 도시하였는데, 보상도가 높아지면 다소 증가하는 경향을 보이고 있으나, 그 영향은 매우 작다.

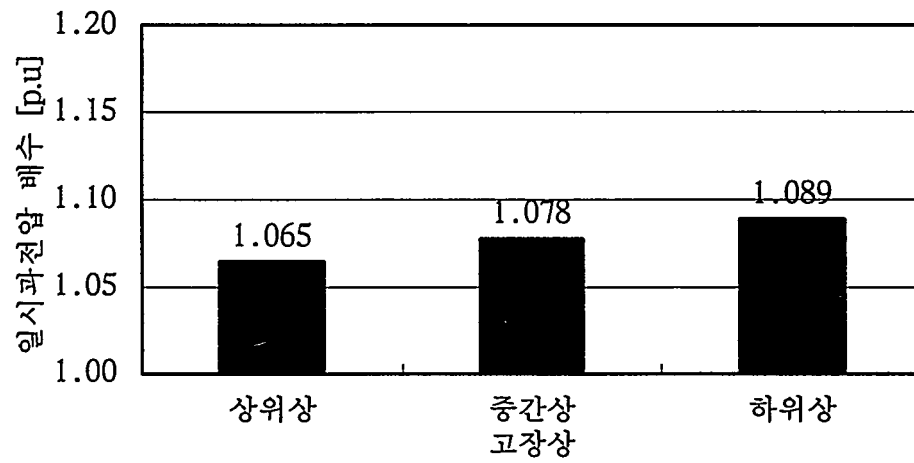


그림 2.5 고장상에 따른 일선지락 일시과전압

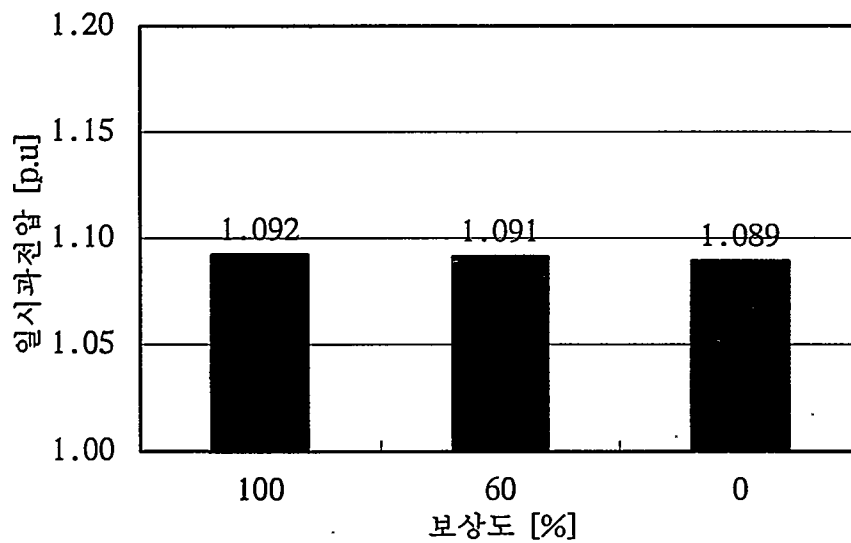


그림 2.6 선로 보상도에 따른 일선지락 일시과전압

3. 345kV 등가 계통의 영향

345kV 계통은 단락 임피던스법을 이용하여 등가 임피던스 및 전압원으로 표현하였으며, 345kV 모선에서의 3상 단락전류가 각각 40 및 60kA 일때를 상정하였다.

<그림 2.7>에 해석 결과를 나타내었으며, 등가 임피던스가 작은 경우, 즉 단락전류가 큰 경우에 높게 나타났다.

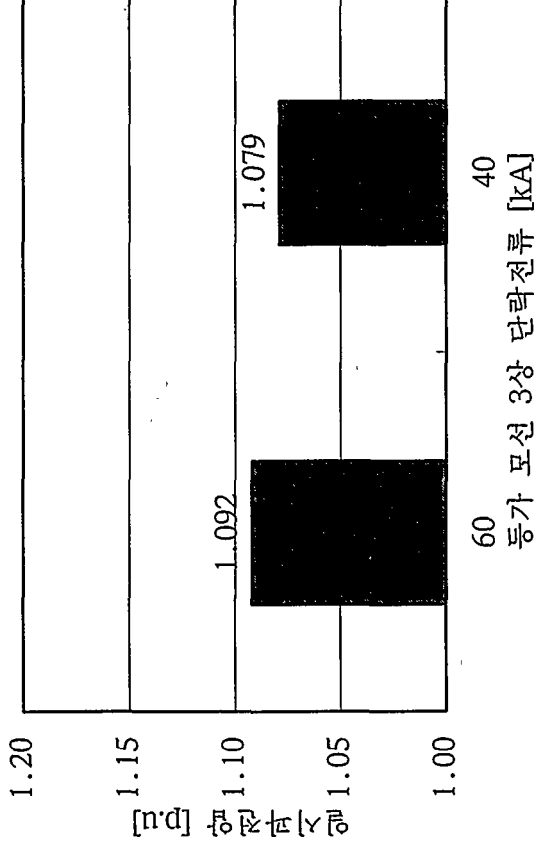


그림 2.7 345kV 계통 등가 임피던스에 따른 일선지락 일시과전압

4. 발전기 운전 대수의 영향

765kV 발전소에서의 운전 발전기가 각각, 5 기 또는 10 기가 가동되고 있을 때의 선로 일선지락 고장에 의한 건전상 전위상승을 해석한 결과를 <그림 2.8>에 나타내었으며, 이 때 승압 변압기는 운전되고 있는 발전기에 각각 단독으로 설치된 것으로 간주하였다.

해석 결과에 의하면 발전기 운전기수가 많을수록(전원측 등가 임피이던스는 작아진다) 높은 일선지락 일시과전압이 발생되었으며, 특히 2 군데의 발전단을 가지고 있는 모델 계통 1 의 경우에는 상당한 차이를 보이고 있다.

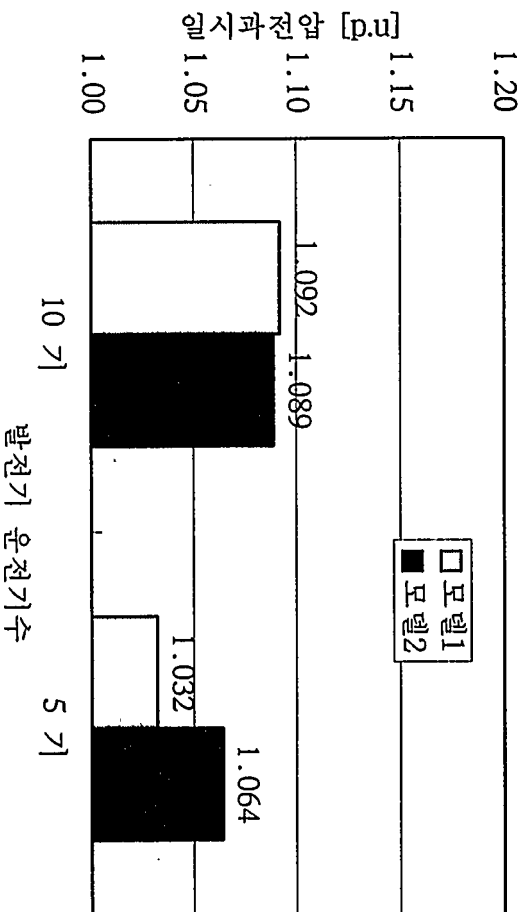


그림 28 발전기 운전대수에 따른 일선지락 일시과전압

5. 선로 운전 회선수의 영향

2 회선 송전선로 중에서 1 회선 만이 운전되고 있을 때의 일선지락 일시과전압 해석 결과를 <그림 2.9>에 나타내었으며, 선로 운전 회선수에 따른 영향은 일관된 증감 경향은 보이지 않고 계통조건에 따라 약간의 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

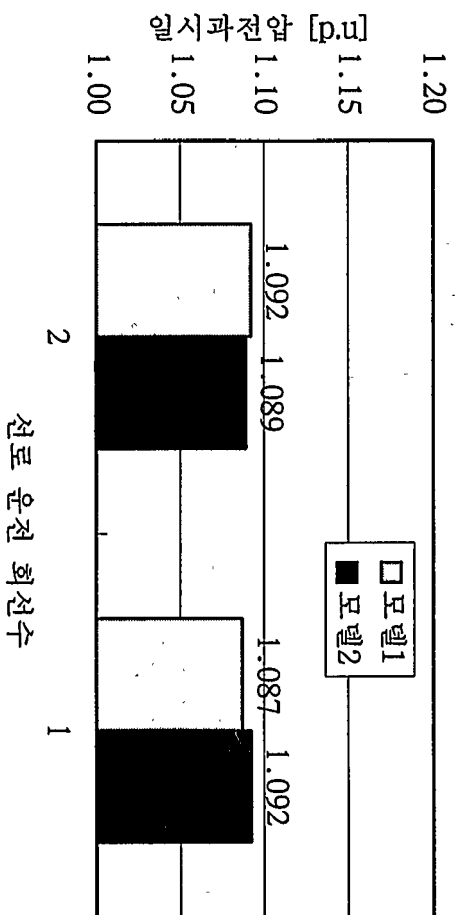


그림 2.9 선로 운전 회전수에 따른 일선지락 일시과전압

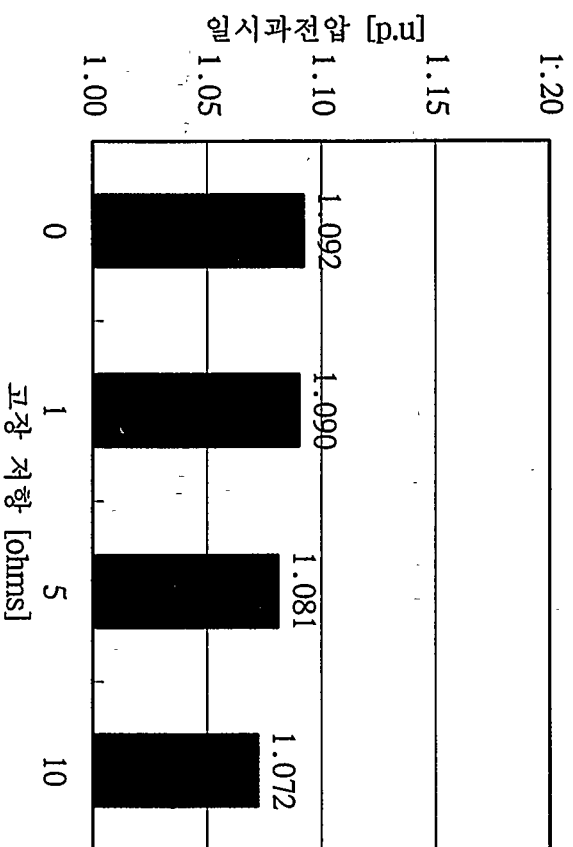


그림 2.10 고장 임피던스에 따른 일선지락 일시과전압

6. 고장 임피던스의 영향

송전선로에서의 지락 고장은 대부분 아크에 의한 지락 고장 형태로 나타나므로 완전 지락 고장은 거의 없고 대부분 지락 저항값(아크 저항값)을 갖는 고장 형태를 갖게 된다. <그림 2.10>에 고장 저항에 따른 일선지락 일시과전압의 변화를 해석한 결과를 도시하였다.

해석 결과에서 알 수 있듯이 일반적인 직접접지 계통에서 나타나는 것과 같이 고장 저항값이 커지면 이에 따른 일선지락 일시과전압은 낮아지는 경향을 보이고 있다.

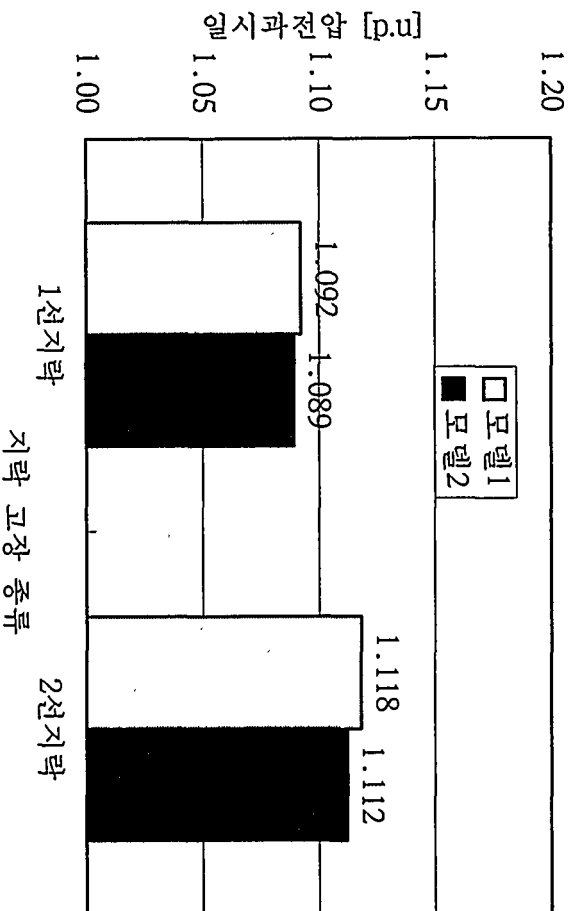


그림 2.11 일선지락 고장 및 2선지락 고장에 의한 일시과전압

7. 2 선지락 고장시 건전상 전위 상승

송전선로에서의 2선지락 고장은, 일선지락 고장에 비해 빈도는 다소 낮지만 비교적 잦은 고장 형태인데, <그림 2.11>에 2선지락 고장시의 건전상 전위상승을 일선지락 고장과 비교하여 나타내었으며, 모델 계통의 경우에는 2선지락에 의한 건전상의 전위상승이 일선지락시에 비해 약간 높게 발생되고 있다.

8. 변압기 증성점 전위상승

국내 765 kV 계획계통은 원칙적으로 직접 접지 운전이 채택될 것으로 예상되나, 특별한 이유에 의해(영상분 임피던스를 증가시켜 고장전류를 감소시키려고 할 때 등) 변압기 증성점을 개방하여 운전할 경우가 있다. 그런데 직접접지계통에서 변압기 증성점을 개방할 경우에는, 변압기 증성점을 폐폐기 등의 보호장치를 통해 접지하여 운전하는 것이 바람직한데, 이러한 변압기 증성점용 폐폐기정격을 선정하기 위해서는 증성점 개방운전시 증성점 전위상승에 대한 검토가 선행되어야 한다.

여기에서는 <그림 2.1>의 모델 계통 2를 대상으로 변압기 증성점 전위상승에 대해 검토하였다. <그림 2.12> 및 <그림 2.13>에 변압기 증성점 개방 운전시 일선지락 일시과전압 해석결과를 도시하였다.

<그림 2.12> 및 <그림 2.13>에서 Tr2 및 Tr3 은 각각 모선 2 및 모선 3에 접속된 변압기를 표시하고 있으며, Tr2-N 및 Tr3-N 은 각각 Tr2 및 Tr3 변압기의 증성점을 나타내고 있다. 변압기 증성점을 개방한 경우의 일선지락 일시과전압은 다소 높아지는 경향을 보이고 있으며, 대상 계통에서 일선지락 고장시 증성점의 전위는 최대 0.3 [p.u] 까지 발생되었다.

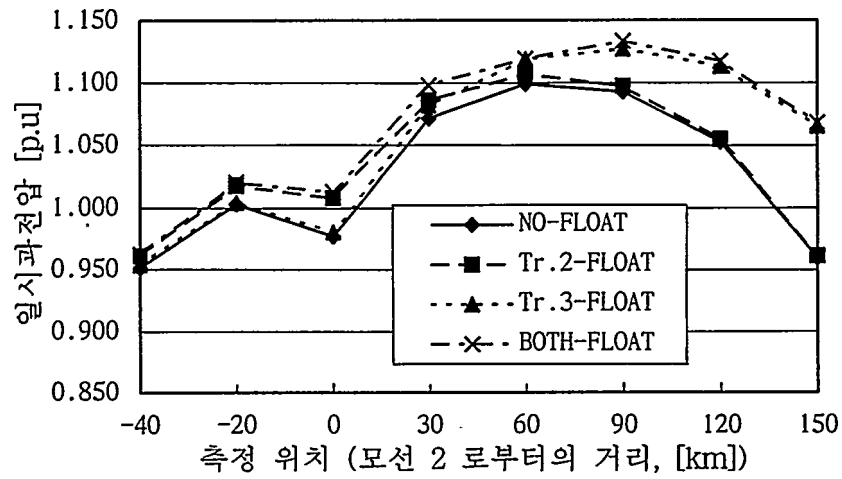


그림 2.12 변압기 중성점 개방 운전시 일선지락 일시과전압

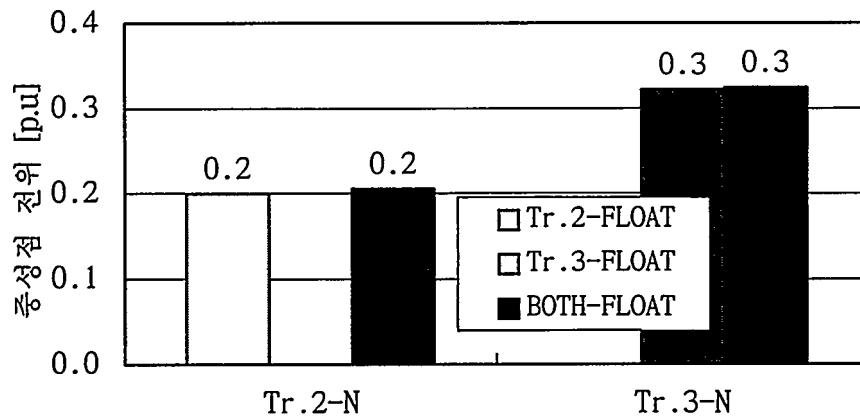


그림 2.13 변압기 중성점 개방 운전시 일선지락에 의한 중성점 전위상승

제 3 장 765kV 계통의 개폐 과전압

송전계통의 절연설계시 고려되어야 하는 개폐 과전압에는, 차단기 투입시에 발생하는 투입 썬어지, 지락전류 차단시에 건전상, 건전계통에 발생하는 차단 썬어지 및 지락직후에 건전상, 건전계통에 발생하는 지락 썬어지 등이 있다.

345kV 이하의 계통에서는 투입 썬어지(특히 재투입 썬어지)에 의한 과전압에 비해 지락 썬어지 및 차단 썬어지에 의해 발생하는 과전압의 크기가 상대적으로 낮기때문에 반드시 고려해야 되는 대상이 아니나, 765kV 이상의 계통에서는 투입 썬어지에 의한 과전압의 목표치를 낮게 두기 때문에 차단 썬어지 및 지락 썬어지에 의한 과전압이 투입 썬어지에 의한 과전압보다 높게 나타날 수도 있다. 따라서 여기에서는 이러한 썬어지에 의한 과전압도 함께 검토하였다.

제 1 절 해석 대상 계통 및 모의 방법

<그림 3.1>에 개폐 썬어지 해석용 모델 계통을 도시하였으며, 각 계통 구성 요소는 다음과 같이 모의하였다.

1. 송전선로

개폐 썬어지는 상당히 넓은 범위의 주파수 성분을 포함하고 있으므로, 송전선로 모의 방법이 해석결과에 상당한 영향을 끼치게 된다. 따라서 여기에서는 개폐 썬어지에 대한 선로의 응답특성을 비교적 실제와 근사하게 표현할 수 있는 주파수 의존모델(EMTP에서 JMARTI 또는 SEMLYEN 모델)에 의해 765kV 송전선로를 표현하였다.

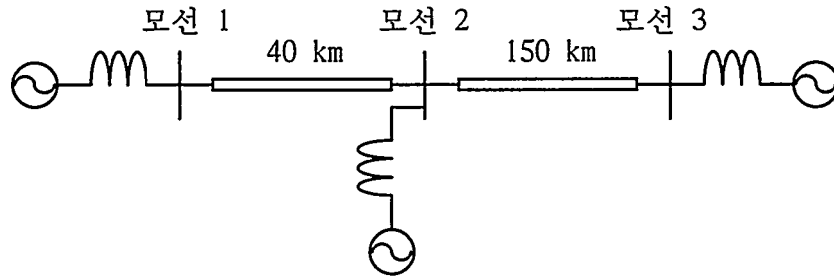


그림 3.1 개폐 써어지 해석용 모델 계통

2. 전원 모델

<그림 3.1>의 모델 계통에서 전원은 다음과 같이 모의하였다.

- 대상 계통의 등가전원의 전압값은 정상상태에서의 최고전압이 1 p.u (계통최고전압, 선간전압 실효치 800kV) 가 되도록 적절히 조정하였다.
- 전원 임피던스는 단락용량에 상응하는 등가 리액턴스로 모의하였다.
- 부하 등의 써어지 댐핑 성분은 무시하였다.
- GIS, 변압기 붓싱 등의 누설 정전용량 등을 고려하여 각 변전소 모선에 0.1 μF 의 집중 캐패시턴스를 삽입하였다.

3. 지락 저항

지락 써어지 해석시에는 지락 저항을 고려하였는데, 지락 저항은 0-10 Ω 의 범위에 대해 검토하였다.

4. 차단기 투입 및 차단 조건

차단기의 투입은 투입 저항을 사용할 때는 1단 투입을 대상으로 하였고, 저항접점과 주접점 간의 시간 간격은 6 - 16 ms에 대해 검토하였으며, 주접점

의 투입시점 분포는 목표시점에서 1 ms의 표준편차를 갖는 정규분포를 갖도록 하였다.

차단기의 차단 동작은, 차단저항을 사용하지 않는 경우에는 고장후 전류 영점에서 주접점을 차단하고, 차단저항을 사용할 경우에는 먼저 고장후 주접점의 전류 영점에서 주접점을 차단하고, 20 - 30 ms 경과후 저항접점의 전류 영점에서 저항접점을 차단하였다.

제 2 절 개폐 과전압 배수(안)

국내 765kV 송전계통의 절연설계 및 절연협조를 위한 개폐 과전압 배수(설계치) 선정은, 계통구성, 계통운전 조건 및 이에 상응하는 제반 상정 조건들의 타당성 등을 토대로 선정되어야 하는데, 현재 국내 765kV 계획 계통에 대한 확정된 계통 구성 방안, 계통 운전 조건 및 구성 기기의 특성이 명확하지 않기 때문에 절대적인 개폐 과전압 배수 선정은 어려우나, 비교적 가능성이 높은 여러 경우들에 검토 결과를 이용하여 <표 3.1>과 같이 국내 765kV 송전계통의 개폐 과전압 배수(안)을 선정하였다.

표 3.1 765kV 송전계통의 개폐 과전압 배수(안)

개폐과전압 배수(안) [p.u]			조 건
선로	상대지간	1.9	- 투입저항 1,000 [Ω] 이하 적용 2 선지락 2상차단까지 고려
	선간	3.5	
변전소	상대지간	1.8	저항투입실패시 재투입과전압
	선간	3.5	

제 3 절 각종 개폐 켜어지의 발생 양상

전력계통에 발생하는 개폐 켜어지를 발생 원인에 따라 분류하면 크게

- 지락 고장시 발생하는 지락 켜어지,
- 지락 고장 차단시 발생하는 차단 켜어지 및
- 무부하 선로 충전시 발생하는 투입 켜어지

의 3가지로 구분할 수 있는데, 투입 켜어지의 경우에는 선로에 잔류 전하가 남아 있는 상태에서 선로를 투입할 때 발생하는 재투입 켜어지를 따로 구분할 수도 있다.

여기에서는 대상계통에서의 각종 개폐과전압 발생양상을 EMTP 및 TNA (Transient Network Analyzer) 를 이용하여 해석한 결과를 비교 검토한 내용에 대해 기술하였다.

1. 지락 켜어지

송전선로에 지락고장이 발생하면, 계전기가 이를 감지하고 차단기에 의해 고장구간이 자동적으로 계통으로부터 분리되나, 고장구간이 차단기의 동작에 의해 계통으로부터 분리되기 전에 발생하는 계통 내의 과도현상 중에서 고장 초기부분의 과도현상은 차단기 등의 스위치류의 조작에 의해 발생하는 개폐 켜어지와 유사한 양상을 보이게 된다. 따라서 지락고장 초기부분의 과도현상시에 발생하는 과전압을 개폐 과전압으로 분류하게 되며, 이러한 지락 켜어지에 의한 개폐 과전압은 345kV 이하의 계통에서는 투입 켜어지(재투입 켜어지 포함)에 의한 과전압에 비해 그 크기가 상대적으로 낮기 때문에 고려하지 않아도 되나, 765kV 이상의 계통에서는 차단저항, 투입저항 및 피뢰기 등의 과전압 억제 요소의 적극적인 도입으로 발생 자체를 억제할 수 있는 투입 켜어지 등에 의한 과전압 목표치를 낮게 두기 때문에 지락 켜어지에 의한 개폐 과

전압이 투입 켜어지기에 의한 개폐 과전압보다 높게 발생할 수도 있다.

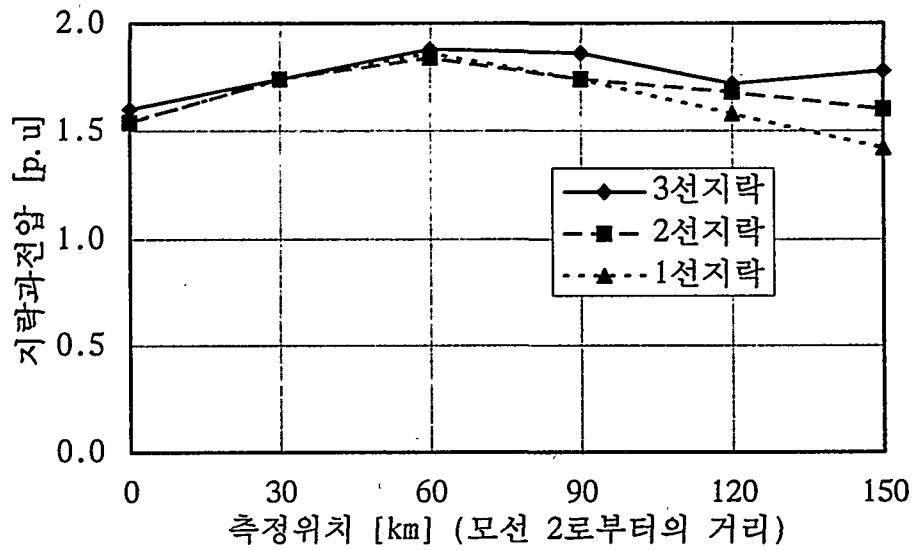
따라서 여기에서는 여러조건에 따른 지락 켜어지기에 의한 과전압을 해석, 검토함으로써 765kV 송전계통의 개폐 과전압 제한 목표치에 대해 검토하였다.

<표 3.2> 및 <그림 3.2>에 지락고장종류에 따른 지락과전압의 변화를 나타내었는데, 도출된 값은 150 km 구간의 선로에서 매 30km 지점지락마다 100회의 통계해석을 통해 획득하였으며, 2 선지락고장은 2 회선 동시지락(양회선 최상위상)일 때를 대상으로 하였다.

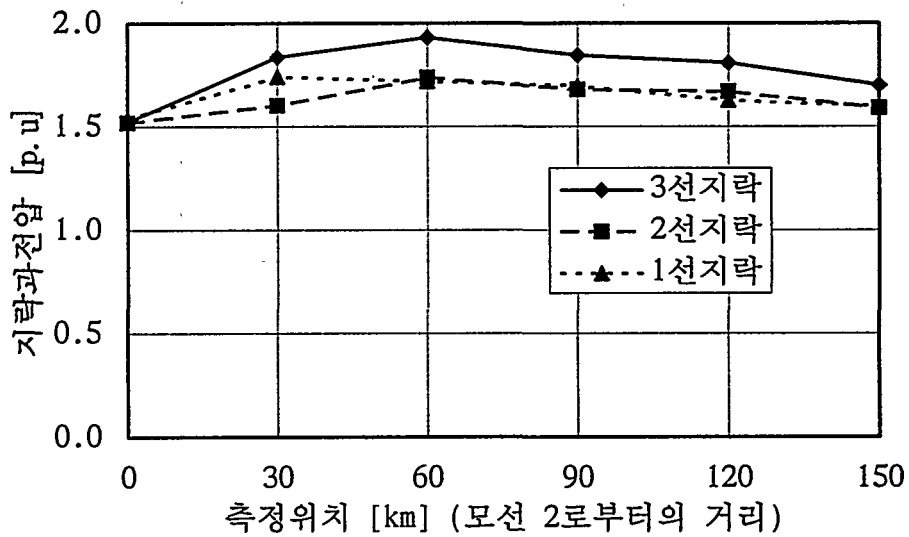
표 3.2 지락고장종류에 따른 지락과전압

[p.u]

측정점 [km]	3 선지락		2 선지락		1 선지락	
	EMTP	TNA	EMTP	TNA	EMTP	TNA
0	1.60	1.52	1.54	1.52	1.54	1.54
30	1.74	1.84	1.74	1.60	1.74	1.74
60	1.88	1.93	1.84	1.74	1.86	1.72
90	1.86	1.85	1.74	1.68	1.74	1.70
120	1.72	1.81	1.68	1.67	1.58	1.63
150	1.78	1.70	1.60	1.59	1.42	1.60
* 1. 측정점은 모선 2 로부터 모선 3 쪽으로의 거리 2. 2 선지락은 양회선 최상위상 지락을 대상						



(가) EMTP 해석 결과



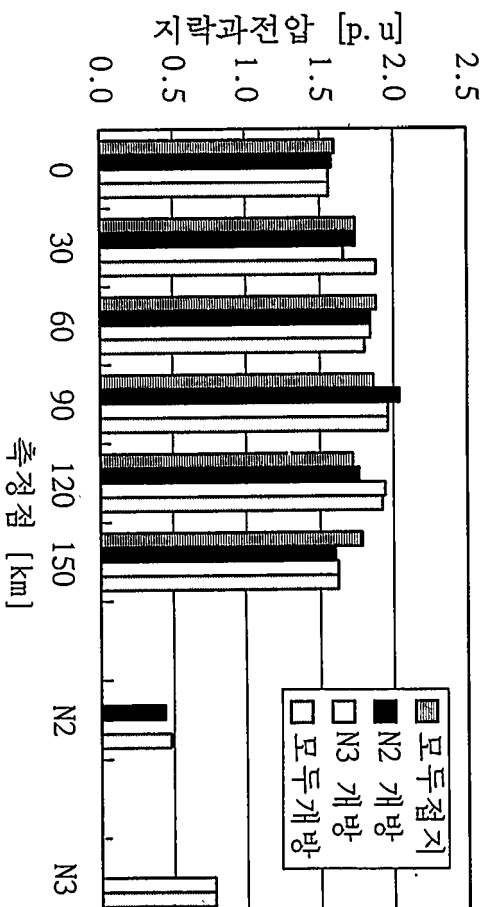
(나) TNA 모의 결과

그림 32 지락고장종류에 따른 지락과전압

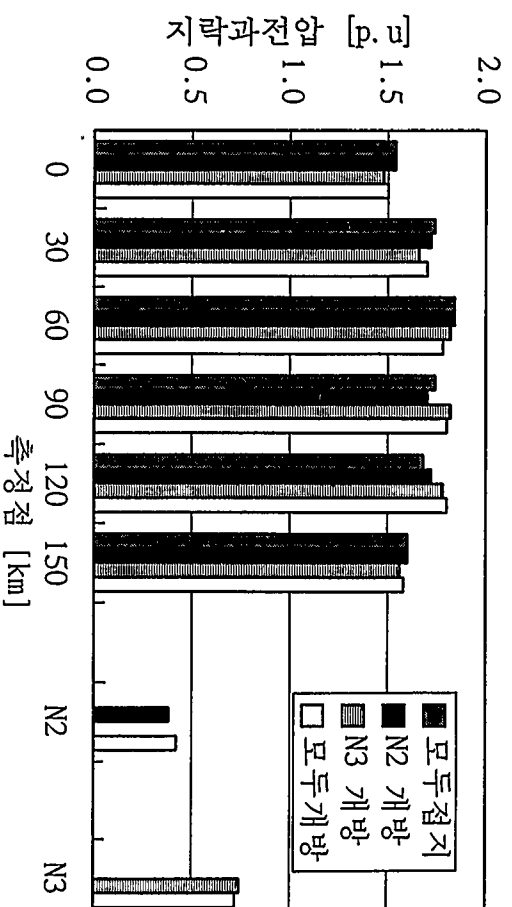
또한 변압기 중성점 개방 운전시 3선지락 및 2선지락(양회선 최상위상 등 시지락)에 의한 지락과전압을 EMTP로 해석한 결과를 <표 3.3> 및 <그림 3.3>에 나타내었으며, 변압기 중성점 개방시의 지락과전압은 변전소 인근에 서는조금 낮아지며 선로에서는 다소 높아지는 경향을 보이고 있다.

표 3.3 변압기 중성점 개방시 지락과전압 [p.u]

측정점	3 선지락				2 선지락			
	C1*	C2*	C3*	C4*	C1*	C2*	C3*	C4*
[km]								
0	1.60	1.58	1.56	1.56	1.54	1.54	1.48	1.50
30	1.74	1.74	1.66	1.88	1.74	1.72	1.66	1.70
60	1.88	1.84	1.84	1.80	1.84	1.84	1.82	1.78
90	1.86	2.04	1.96	1.96	1.74	1.70	1.82	1.80
120	1.72	1.76	1.94	1.92	1.68	1.72	1.78	1.80
150	1.78	1.60	1.62	1.62	1.60	1.60	1.56	1.58
N2*	-	0.44	-	0.48	-	0.38	-	0.42
N3*	-	-	1.78	0.78	-	-	0.74	0.72
* N2 : 모선 2 에 접속된 변압기의 중성점 N3 : 모선 3 에 접속된 변압기의 중성점 C1 : 모든 중성점 접지 C2 : N2 개방, N3 접지 C3 : N2 접지, N3 개방 C4 : N2 개방, N3 개방								



(가) 3선지락고장시



(나) 양회선 최상위상 지락시

그림 3.3 변압기 중성점 개방시 지락과전압

해석결과로부터 국내 765kV 송전계통에서, 지락고장에 의해 발생되는 지락 과전압은 대략 <표 3.4>와 같이 상정할 수 있으며, 표의 값은 국내 765kV 송

전계통의 절연설계 및 협조를 위한 개폐과전압 배수의 최저 제한치를 나타내기도 한다.

표 3.4 765kV 송전계통의 지락고장에 의한 과전압 배수

구 분	지락과전압 [p.u]		비 고 (조 건)
	상대지간	선간	
가공선로	1.9	2.3	• 2 선지락(양회선지락)까지 고려
변전소	1.6	2.3	• 3 선지락까지 고려

2. 투입 및 재투입 켜어지

송전선로를 차단기에 의해 투입할 때 발생하는 투입꺼어지에 의한 과전압은, 차단기의 투입 위상, 상간의 투입 시간 차 등의 요인에 따른 발생 켜어지의 변화가 크며, 특히 765kV 이상의 계통에서는 개폐과전압이 송전선로의 절연설계를 지배하는 주요인이 되므로 투입저항 등의 켜어지 억제 수단의 적극적인 도입이 필수적이다.

차단기의 투입에 의해 발생하는 투입 켜어지는 대상 계통의 구성상태에 따라 다르게 나타나는데, 일반적으로 계통 구성상태가 복잡해지면 켜어지 임피던스 비정합지점에서 부반사가 발생됨으로 인해 발생 과전압의 크기가 낮아지게 된다. 여기에서는 <그림 3.1>의 대상 계통에서 모선 2 와 모선 3 사이의 선로에 대한 투입 및 재투입 켜어지에 대해 해석하였으며, 재투입 모의 방법은 다음과 같다.

- EMTP : 선로잔류전압이 1 [p.u] 가 되도록 초기조건을 설정한다.
- TNA : 지락고장-차단-재투입 형태로 직접 모의한다.

<표 3.5>, <표 3.6> 및 <그림 3.4>에서 <그림 3.7>까지 무부하 선로 투입 및 재투입시의 과전압 해석 결과를 나타내었으며, 해석 결과로부터 국내 765 kV 계획계통에서의 투입 과전압은 <표 3.7>과 같이 상정할 수 있다.

표 3.5 765kV 송전계통의 투입과전압

[p.u]

종 류	측정 [km]	해석 도구	투입 저항 [Ω]							
			0	200	300	400	600	800	1000	1200
상 대 지 간	0	TNA	1.476	1.204	1.127	1.121	1.204	1.268	1.320	1.362
		EMTP	1.650	1.300	1.250	1.350	1.450	1.500	1.550	1.600
	50	TNA	1.915	1.288	1.231	1.297	1.453	1.515	1.627	1.705
		EMTP	2.150	1.450	1.400	1.450	1.650	1.800	1.900	1.950
	100	TNA	2.007	1.389	1.296	1.382	1.520	1.652	1.762	1.833
		EMTP	2.100	1.600	1.400	1.550	1.700	1.800	1.900	1.950
	150	TNA	1.702	1.461	1.314	1.429	1.542	1.620	1.655	1.672
		EMTP	1.700	1.600	1.500	1.550	1.600	1.650	1.650	1.700
선 간	0	TNA	2.436	1.922	1.945	2.024	2.120	2.181	2.225	2.277
		EMTP	3.000	2.250	2.100	2.200	2.400	2.500	2.600	2.700
	50	TNA	3.107	2.079	2.050	2.158	2.375	2.551	2.659	2.735
		EMTP	3.350	2.350	2.250	2.400	2.650	2.750	2.900	3.000
	100	TNA	3.309	2.079	2.129	2.267	2.524	2.738	2.870	2.954
		EMTP	3.750	2.600	2.300	2.500	2.750	3.000	3.150	3.250
	150	TNA	3.253	2.186	2.199	2.369	2.673	2.893	2.999	3.060
		EMTP	3.350	2.750	2.500	2.700	3.050	3.150	3.250	3.250

표 3.6 765 kV 송전계통의 재투입과전압

[p.u]

종 류	측정점 [km]	해석 도구	투입 저항 [Ω]							
			0	200	300	400	600	800	1000	1200
상 대 지 간	0	TNA	1.667	1.488	1.463	1.433	1.403	1.393	1.368	1.344
		EMTP	1.750	1.550	1.550	1.550	1.500	1.500	1.550	1.600
	50	TNA	2.703	1.553	1.517	1.472	1.420	1.527	1.625	1.701
		EMTP	2.400	1.800	1.550	1.550	1.650	1.800	1.900	1.950
	100	TNA	2.007	1.389	1.296	1.382	1.520	1.652	1.762	1.833
		EMTP	2.100	1.600	1.400	1.550	1.700	1.800	1.900	1.950
	150	TNA	1.802	1.592	1.537	1.506	1.518	1.594	1.634	1.658
		EMTP	1.750	1.650	1.650	1.600	1.600	1.650	1.650	1.700
선 간	0	TNA	3.120	2.589	2.492	2.413	2.322	2.246	2.204	2.246
		EMTP	3.450	2.450	2.350	2.200	2.400	2.500	2.600	2.700
	50	TNA	3.107	2.079	2.050	2.158	2.375	2.551	2.659	2.735
		EMTP	3.350	2.350	2.250	2.400	2.650	2.750	2.900	3.000
	100	TNA	4.633	2.448	2.266	2.286	2.540	2.729	2.864	2.917
		EMTP	4.500	3.200	2.750	2.500	2.800	3.000	3.150	3.250
	150	TNA	3.566	2.636	2.398	2.374	2.632	2.849	2.963	3.054
		EMTP	3.450	3.250	2.950	2.700	3.050	3.200	3.250	3.250

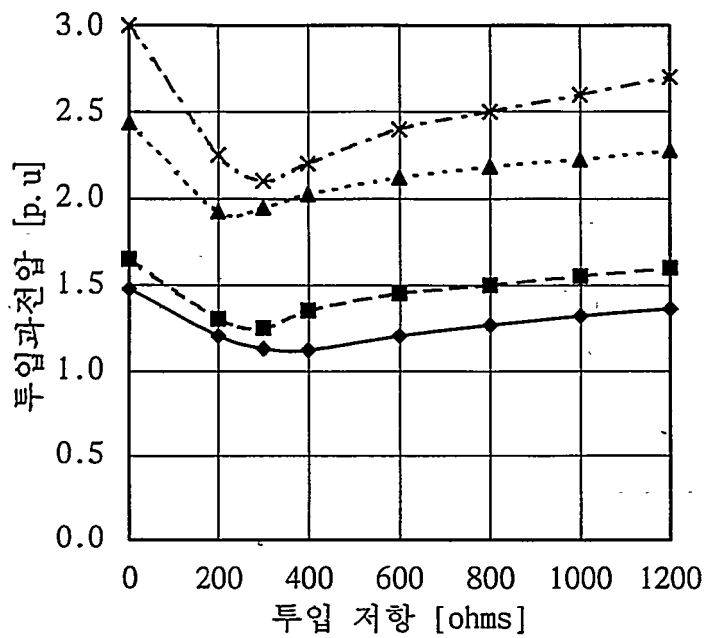


그림 3.4 변전소내 투입과전압

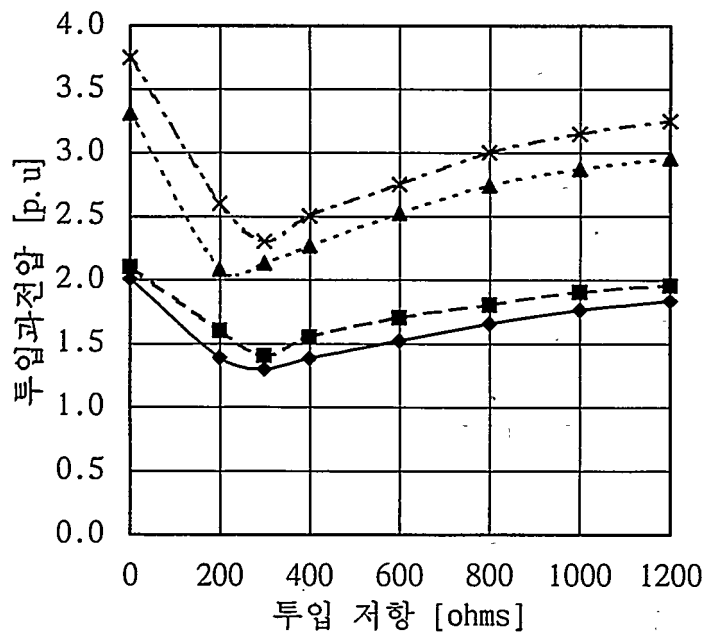


그림 3.5 선로에서의 투입과전압

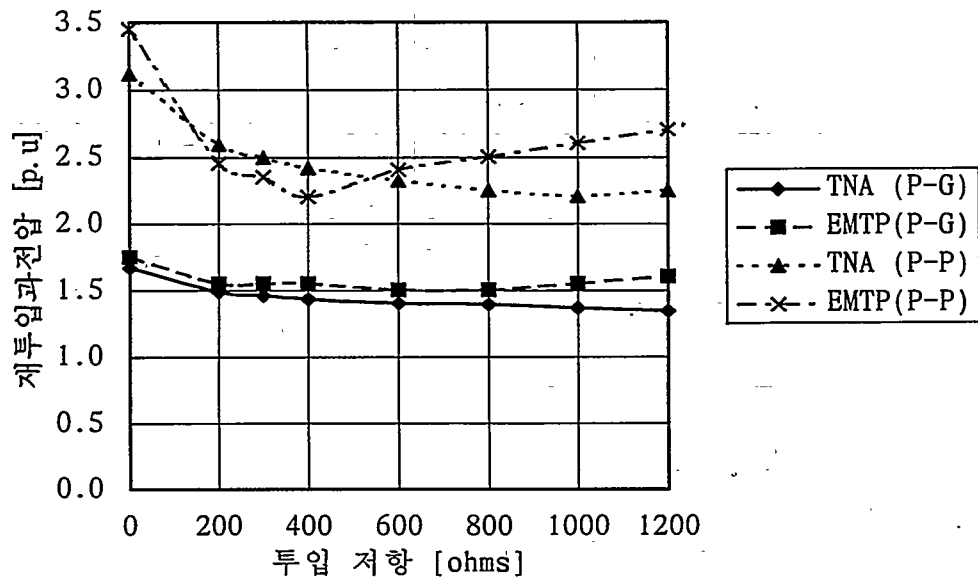


그림 3.6 변전소내 재투입과전압

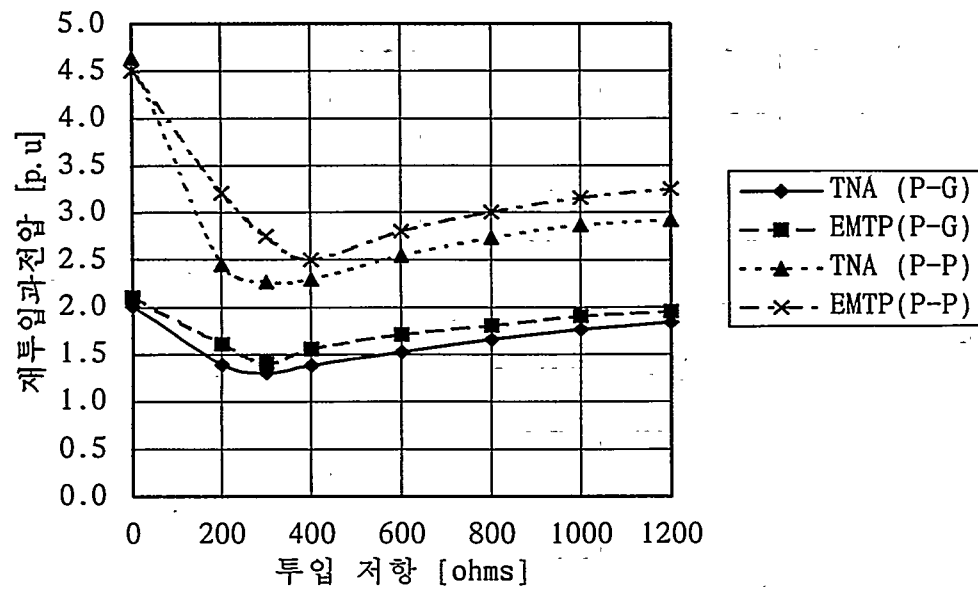


그림 3.7 선로에서의 재투입과전압

표 3.7 765kV 송전계통의 투입 및 재투입 과전압 배수

구 분	투입과전압 [pu]		비 고 (조 건)
	상대지간	선간	
가공선로	1.9	3.3	• 투입저항 1000 [Ω] 이하
변전소	1.8	3.5	• 저항투입실패 고려

3. 차단 켜어지

송전선로에 지락고장이 발생하면, 계전기가 이를 감지하고 차단기에 의해 고장구간이 자동적으로 계통으로부터 분리되는데, 고장전류를 차단기가 차단할 때에 발생하는 켜어지에 의한 과전압은 345kV 이하의 계통에서는 투입켜어지(재투입켜어지 포함)에 의한 과전압에 비해 그 크기가 상대적으로 낮기 때문에 고려하지 않아도 되나, 765kV 이상의 계통에서는 투입저항 및 피뢰기 등의 과전압 억제 요소의 적극적인 도입으로 투입켜어지의 발생 자체를 억제하여 과전압 목표치를 낮게 두기 때문에 차단켜어지에 의한 개폐과전압이 투입켜어지에 의한 개폐과전압보다 높게 발생할 수도 있다. 따라서 765kV 이상의 계통에서 개폐과전압 제한 목표치를 설정하기 위해서는 차단 켜어지에 대한 충분한 검토가 반드시 행해져야 한다.

여기에서는 여러조건에 따른 차단 켜어지에 의한 과전압을 해석, 검토한 내용을 기술하였다.

<표 38> 및 <그림 38>, <그림 3.9>에 고장종류 및 차단방식에 따른 차단과전압 변화를 나타내었으며 (2LG-2LO : 양회선 최상위상지락-차단), 해석결과로부터 국내 765kV 송전계통에서 고장차단시 발생하는 차단과전압 배수를 <표 3.9>와 같이 상정할 수 있다.

표 3.8 765 kV 송전계통의 고장종류 및 차단방식에 따른 차단과전압

[p.u]

종 류	측정점 [km]	해석 도구	고장종류-차단방식			
			3LG-3LO	2LG-3LO	1LG-3LO	2LG-2LO*
상 대 지 간	0	TNA	1.642	1.612	1.454	1.51
		EMTP	1.627	1.569	1.526	1.700
	30	TNA	1.821	1.832	1.586	1.596
		EMTP	1.872	1.724	1.641	1.762
	60	TNA	1.979	2.005	1.746	1.681
		EMTP	2.044	1.870	1.686	1.828
	90	TNA	2.138	2.137	1.944	1.883
		EMTP	2.022	1.918	1.690	1.871
	120	TNA	2.083	2.05	1.894	1.855
		EMTP	1.810	1.794	1.625	1.828
	150	TNA	1.639	1.631	1.592	1.611
		EMTP	1.608	1.553	1.480	1.646
선 간	0	EMTP	2.859	2.878	2.606	2.570
	30		3.129	2.975	2.714	2.917
	60		3.244	3.083	2.816	2.922
	90		3.165	3.080	2.840	2.909
	120		2.994	2.992	2.761	2.861
	150		2.819	2.823	2.625	2.703
* 양회선 최상위상 지락-차단						

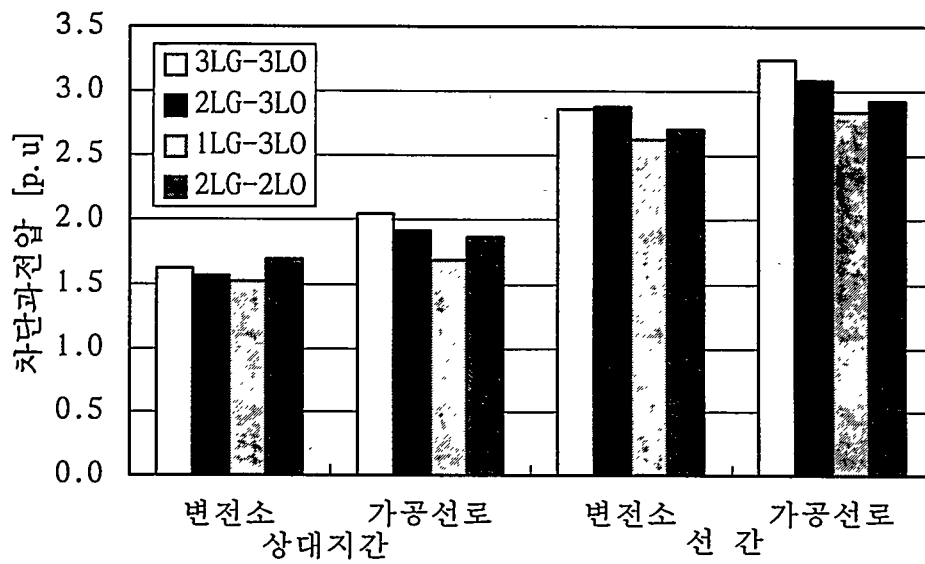


그림 3.8 765 kV 송전계통의 차단과전압

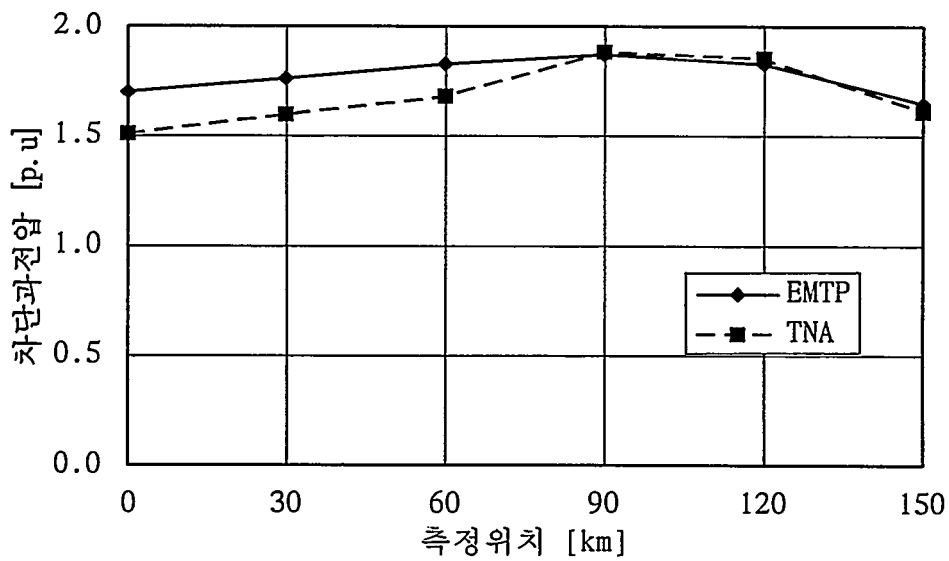
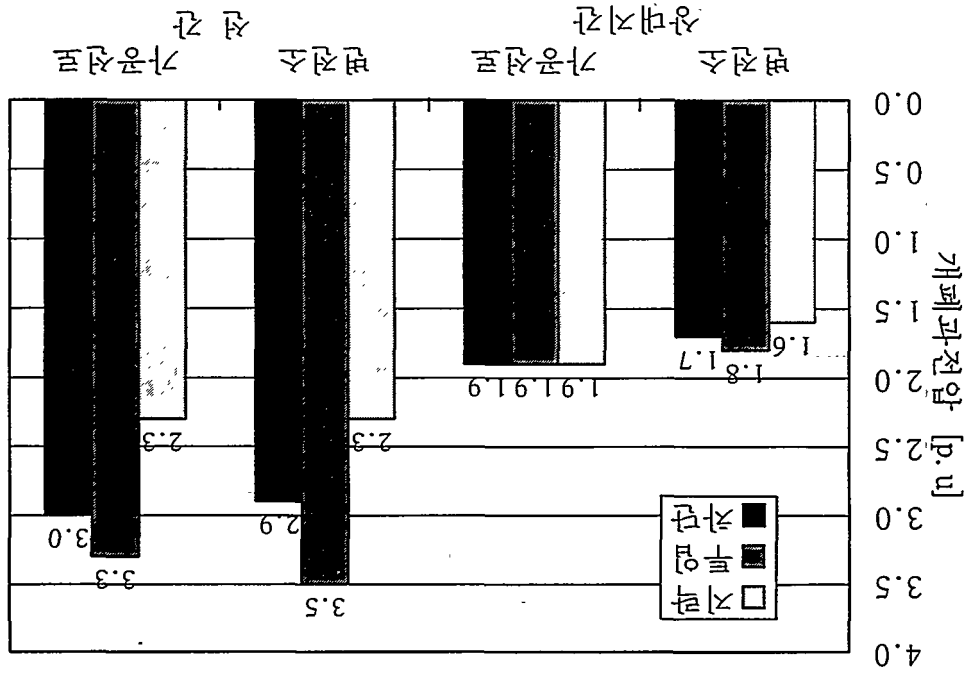


그림 3.9 차단과전압 분포(2LG-2LO, 상대지간)

그림 3.10 765kV 송전계통의 탈세 원인별 최대 개폐 과전압



앞서 기술한 내용과 대응으로 국내 765kV 계획 계통에 탈세되는 개폐 과전압의 탈세 원인별 상정값을 종합하면 <그림 3.10>과 같다.

4. 탈세 원인별 개폐과전압 비교

구분	차단과전압 [p.u.]		비고 (조건)
	상대지간	선간	
변전소	1.7	2.9	• 3선지락-3상차단까지 고려
가운선로	1.9	3.0	• 양회선최상위상지락-차단까지 고려

표 3.9 765kV 송전계통의 차단 과전압 배수

제 4 장 765kV 가스절연 변전소의 뇌과전압

변전소에 발생하는 뇌과전압은 송전선로에 침입한 뇌써어지가 변전소로 침입함으로써 발생되는데, 송전선로의 뇌격침입양상은 크게

- 차폐실패 : 가공지선이 효과적으로 뇌격을 차폐하지 못하고 뇌격이 상도체에 직접 가해짐으로써 뇌써어지가 침입하는 경우와
- 역섬락 : 가공지선 또는 철탑에 가해진 뇌격에 의해 철탑의 전위가 상승하여 애자 또는 아킹혼에 섬락이 발생하여 뇌써어지가 상도체로 침입하는 경우로 나눌수 있다.

그러나 통상 765kV 2회선 송전선로의 가공지선 차폐각은 음의 값을 가지게 되므로 대부분의 뇌과전압은 역섬락에 의해 발생되며, 일부 수 kA 의 뇌격전류가 차폐실패에 의해 침입할 수 있으나, 이에 의한 뇌과전압은 역섬락에 의해 발생하는 뇌과전압에 비해 비교적 낮은 값을 가지게 된다.

여기에서는 변전소 인근 철탑(첫번째 철탑) 꼭대기에 가해진 뇌격이 역섬락에 의해 변전소로 침입하여 발생하는 뇌과전압에 대하여 해석하였다.

제 1 절 대상 변전소 및 해석 조건

변전소 내에 발생하는 뇌과전압은

- 침입하는 뇌써어지의 형태
- 송전선로 절연물의 섬락 특성
- 변전소내 기기 배치 및 구성
- 소내 기기의 진행파에 대한 응답특성

등의 영향을 받게 되므로, 이러한 여러 요인들에 대한 변전소내 뇌파전압 분포 특성을 해석, 검토함으로써 합리적이고 경제적인 변전소 절연협조를 달성할 수 있다.

1. 뇌격 침입 조건

송전선로의 역섬락에 의해 변전소로 침입하는 뇌써어지는

- 가해지는 뇌격의 파형 및 크기
- 송전철탑의 써어지 전파 특성
- 뇌격 및 역섬락 지점
- 아킹흔 또는 애자런의 역섬락 특성 및
- 송전선로의 써어지 전파특성

등의 영향을 받게 된다.

뇌써어지 해석시의 선로 모델 방법에는

- 단상 모델 : 역섬락이 발생하는 상도체만을 모의하는 방법
- 전체 모델 : 가공지선을 포함한 전체 선로 구성 도체를 모의하는 방법으로, 가공지선 2 조를 갖는 2회선 선로의 경우에는 8 상 모델이 된다.
- 2 상 모델 : 가공지선과 역섬락이 발생하는 상도체만을 모의하는 방법

의 3가지가 있는데, 3가지 방법 모두 장단점을 가지고 있으며, 뇌격의 불확실성, 기타 기기 모델 및 정수의 부정확성 등에 의한 오차가 발생되기 때문에 송전선로만을 상세히 모의할 필요는 없다. 여기에서는 가공지선과 역섬락이 발생하는 상도체만을 고려한 2 상 모델(<그림 4.1> 참조)을 사용하여 모의하였다.

역섬락이 발생하는 아킹흔의 모의 방법에는

- 단순 스위치로 모의하는 방법
- 일정 아크 인덕턴스를 고려한 스위치로 모의하는 방법 및

- 아크 동특성을 고려한 가변 아크 인덕턴스를 사용하여 모의하는 방법 등이 있는데, 마지막 방법에 의한 아킹혼의 모의가 가장 정확한 해석 결과를 얻을 수 있다고 알려져 있으나, 국내 765kV 계획선로에 사용될 아킹혼의 아크 동특성을 얻을 수 없으므로, 여기에서는 <그림 4.2>에 나타낸 것과 같이 아크 인덕턴스를 일정한 값으로 가정한 두번째 방법에 의해 아킹혼을 표현하였으며, 아킹혼의 섬락시점은 아킹혼의 전압-시간 특성과 아킹혼에 가해지는 켜어지 파형과의 교점을 EMTP의 TACS 기능을 사용하여 해석 중에 자동적으로 섬락시점을 찾으도록 하는 방법을 사용하였다.

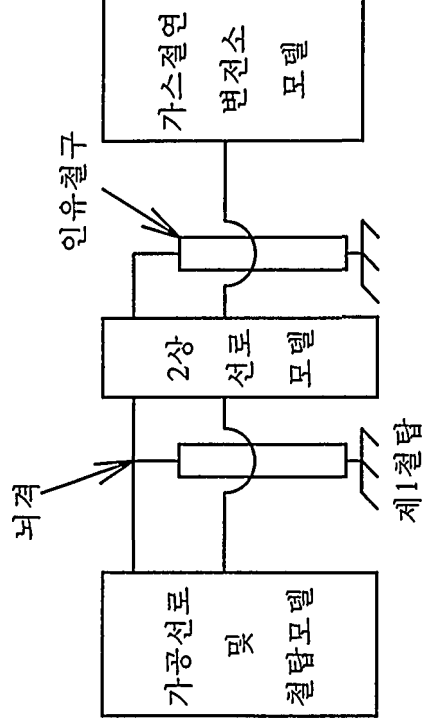


그림 4.1 뇌격 침입 회로도

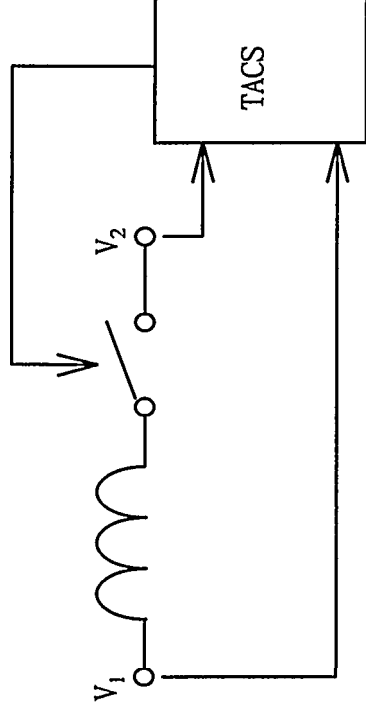


그림 4.2 아킹혼 모델(TACS 이용)

송전철탑 모델은 실질적으로 아킹혼에 가해지는 뇌써어지 전압 파형 및 크기에 직접적인 영향을 끼치는 요인이 되므로, 여기에서는 역섬락이 발생하는 철탑은 다단(2회선 수직배열 철탑의 경우에는 4단, <그림 4.3> 참조)으로 모의하였으며, 그외의 철탑은 단일 분포정수 모델에 의해 표현하였다.

뇌격전류 모델은 <그림 4.4>와 같이 단순한 램프 함수의 조합에 의해 표현하였으며, 파고치 및 파두장의 변화에 대한 변전소내 뇌과전압 발생 양상의 변화도 검토하였다.

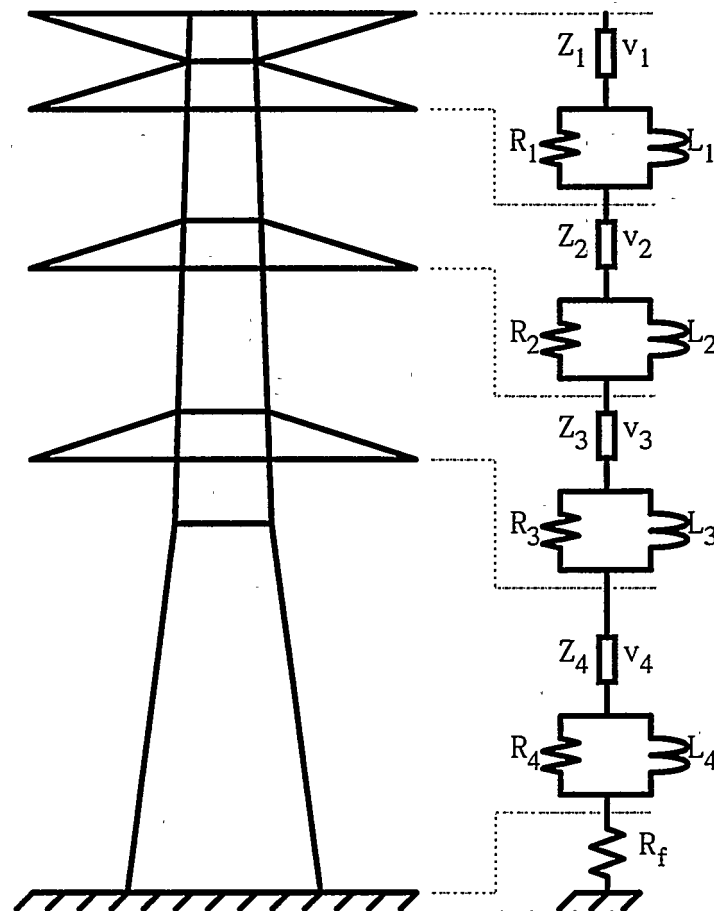


그림 4.3 4 단 철탑 모델

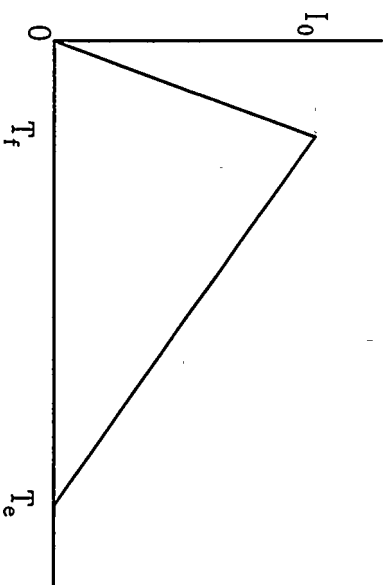


그림 4.4 뇌격전류파형 모델

2. 변전소 구성 조건

역섬락에 의해 송전선로에서 발생한 뇌찌어지가 변전소로 침입하게 되면 변전소 구성 기기들의 응동특성 및 기기 배치 상태 등에 따라 변전소내 각 기기에 발생되는 뇌과전압이 변하게 된다.

현재 확정된 변전소 구성 여건은 없으나, 비교적 가능성이 높은 형태를 상정하여 변전소 내 기기 구성 및 정수를 사용하여 모의하였으며, <표 4.1>에 변전소 구성 조건을 나타내었다.

표 4.1 대상 변전소 구성 조건

형 식	옥외 가스 절연 변전소	
모선 방식	1½ CB 모선 방식(2가지 형태)	
회선 및 뱅크수	6 회선 4 뱅크(또는 5 뱅크)	
모선 구성 회로도	<그림 4.5> ~ <그림 4.7>	

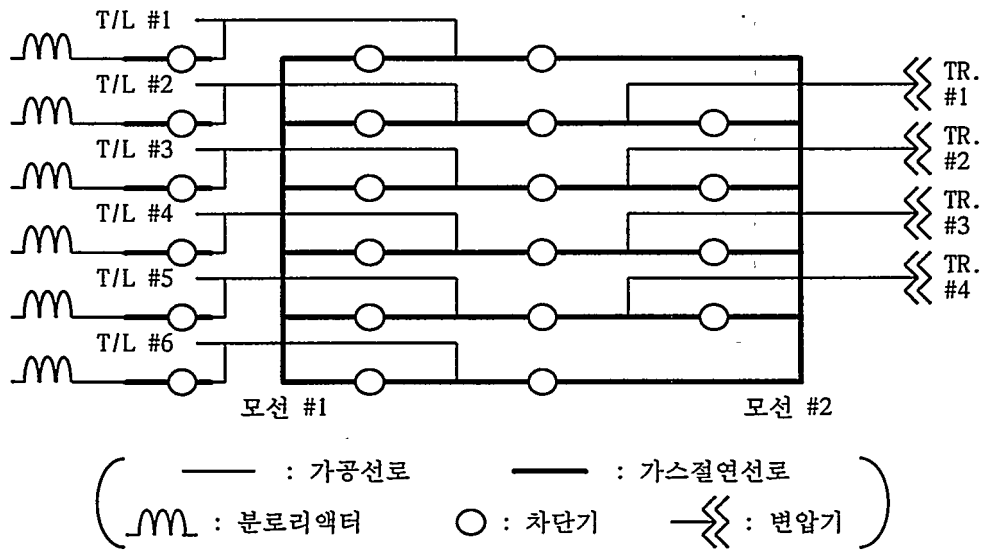


그림 4.5 1½ CB 방식 I (변전소 구성 1) 모선 구성도

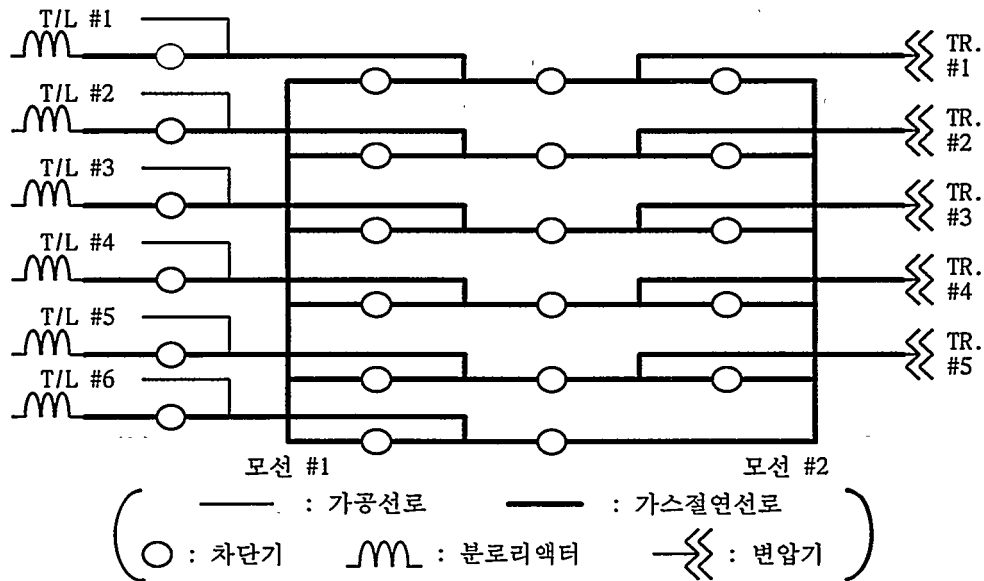


그림 4.6 1½ CB 방식 II (변전소 구성 2) 모선 구성도

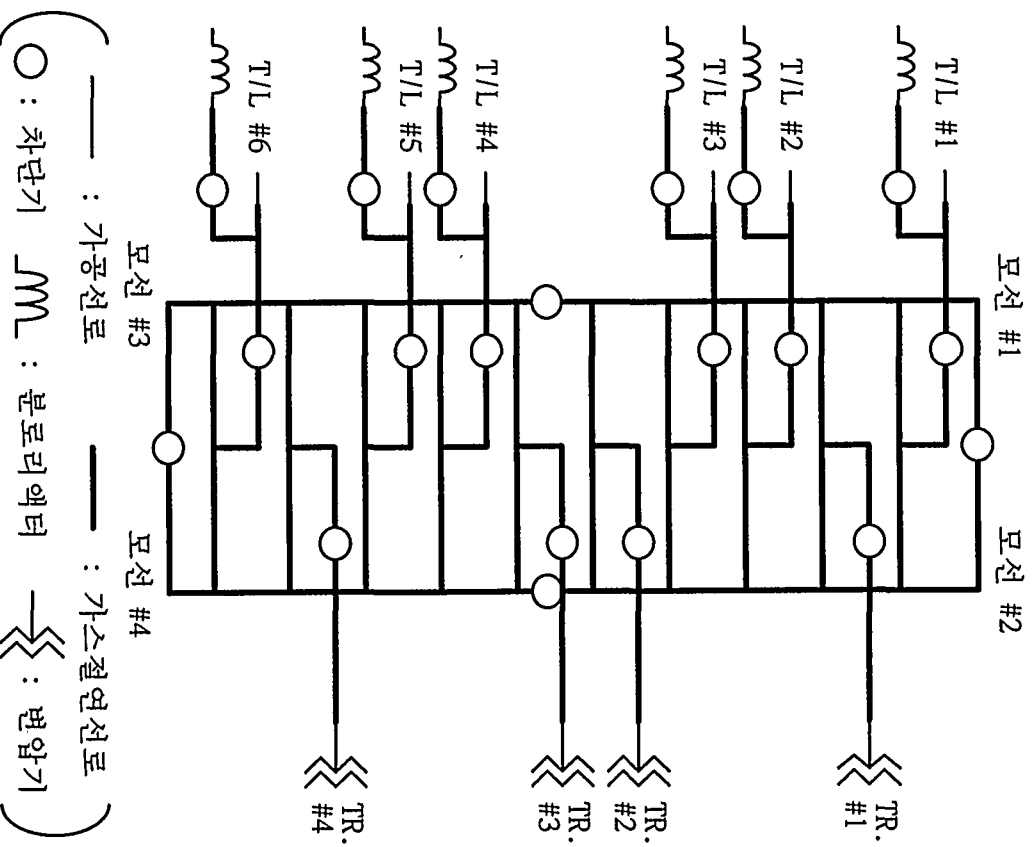


그림 4.7 2종모선 4 BUS-TIE 방식(변전소 구성 3) 모선 구성도

한편 765kV 변전소를 구성하는 기기에는, 가스절연 모선 및 스위치기어류, 분포 리액터, 변압기 등이 있는데, 이들 기기들을 뇌싸여지로부터 효과적으로 보호하기 위해, 설치되는 피뢰기를 송전선로 인출부 보호용, 모선 및 스위치기어부 보호용, 변압기 보호용의 세가지 그룹으로 나누어 검토하였으며, 각 그룹의 가장 가혹한 조건을 상정하기 위해 변전소 회로 구성을 적절히 모의하였다.

3. 기기류의 모의

<표 4.2>에 모의 대상 피뢰기의 전압-전류 특성을 나타내었으며, <그림 4.8>에 기본 대상으로 검토한 B 특성의 전압-전류 곡선을 도시하였다. 기타 기기들은 뇌써어지의 주파수 영역이 매우 높기 때문에 단일 집중 캐패시턴스로 모의하여도 해석상 큰 문제를 발생하지 않는다. 해석에 사용된 각종 기기들의 누설 캐패시턴스 값은 다음과 같다.

- 변압기 : 9,000 pF (붓싱 포함)
- 분로 리액터 : 2,000 pF (붓싱 포함)
- 붓싱 : 400 pF

표 4.2 모델 계통에 사용된 ZnO 피뢰기의 전압-전류 특성 (단위 [kV])

특성 \ 전류	1 [mA]	1 [A]	0.01 [kA]	0.1 [kA]	1 [kA]	10 [kA]	20 [kA]	35 [kA]	50 [kA]	70 [kA]
A	815	989	1,018	1,084	1,185	1,345	1,418	1,491	1,556	1,629
B	844	909	931	996	1,098	1,244	1,309	1,382	1,440	1,513
C	785	829	851	909	996	1,127	1,178	1,236	1,287	1,345
D	-	914	950	994	1,080	1,330	1,418	1,530	-	-
E	-	-	-	-	1,126	1,284	1,358	1,468	-	-
F	-	-	-	-	1,161	1,324	1,401	1,515	-	-
G	-	-	-	-	1,243	1,450	1,580	1,760	-	-
H	-	-	-	-	1,337	1,595	1,730	1,895	-	-
I	-	-	-	-	1,283	1,416	1,474	1,585	-	-

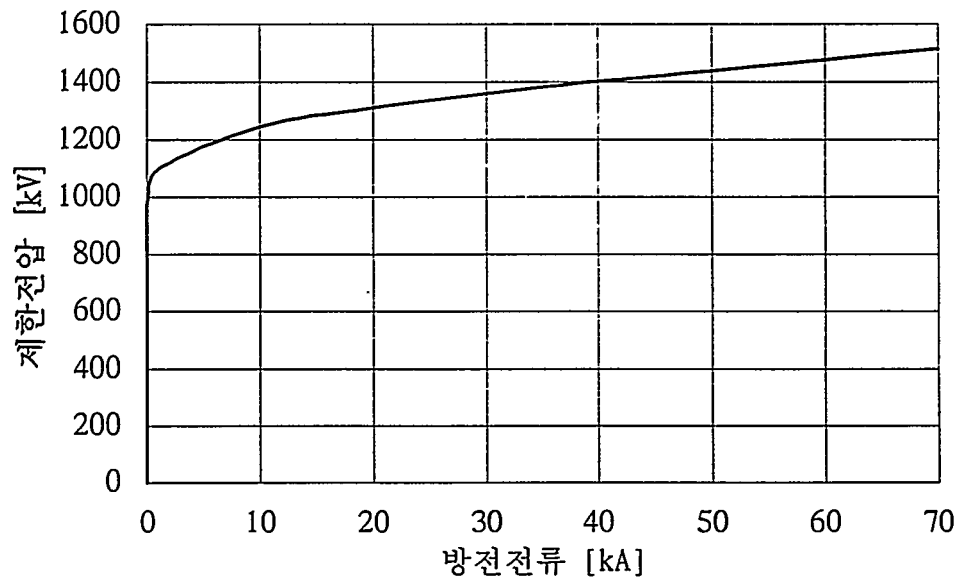


그림 4.8 검토 대상 피뢰기의 전압-전류 특성 곡선 예 (특성 B)

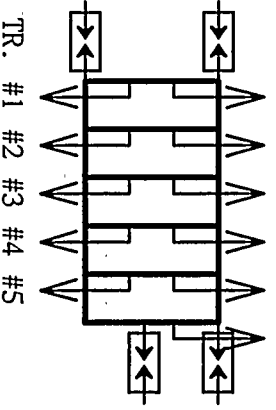
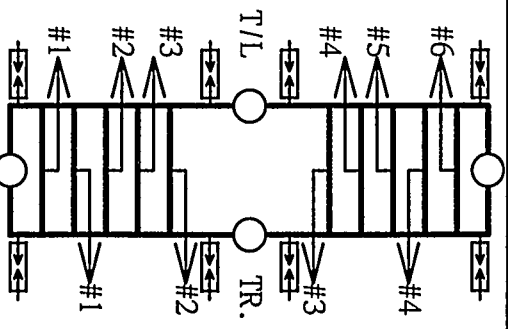
4. 해석 기준

<표 4.3>에 해석 기준을 나타내었으며, 별도의 기술이 없는 경우는 해석 기준 값을 사용하여 해석하였다.

표 4.3 해석 기준

항 목	기 준 값
뇌격전류 파형	1/70 μ s
뇌격전류 크기	170 kA
송전선로 모델	2상 모델
탑각 저항	10 Ω
피뢰기 특성	B 특성

표 4.5 모선 보호용 피뢰기 설치위치 (안)

변전소 구성	피뢰기 설치위치(안)	피뢰기 설치위치도(안)	비 고
1½ CB 모선 방식 I, II	- 각 모선 양단	 T/L #1 #2 #3 #4 #5 #6 TR. #1 #2 #3 #4 #5	- 모선 길이가 100 [m] 이하가 되도록 하는 것이 바람직하다. - 개방가능한 부분에 근접하여 설치한다.
2중모선 4 BUS_TIE	- 각 모선 양단	 T/L #1 #2 #3 #4 TR. #1 #2 #3 #4	○ : BUS_TIE - 개방가능한 부분에 근접하여 설치한다.

한편 대상 계통에 고속접지개폐기를 적용할 경우에는 고속접지개폐기의 선로측에 추가의 피뢰기를 설치하여야 하며, 설치위치는 가능한 고속접지개폐기에 근접시키는 것이 바람직하다. 변압기 보호용 피뢰기에 대해서는 단일 피뢰기를 변압기에 가능한 근접하여 설치하는 것을 기본 조건으로하여 변압기와 의 이격거리에 대해 검토하였는데, 검토 결과에 의하면 변압기 보호용 피뢰기의 이격거리는 최대 15 [m] 이내로 하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

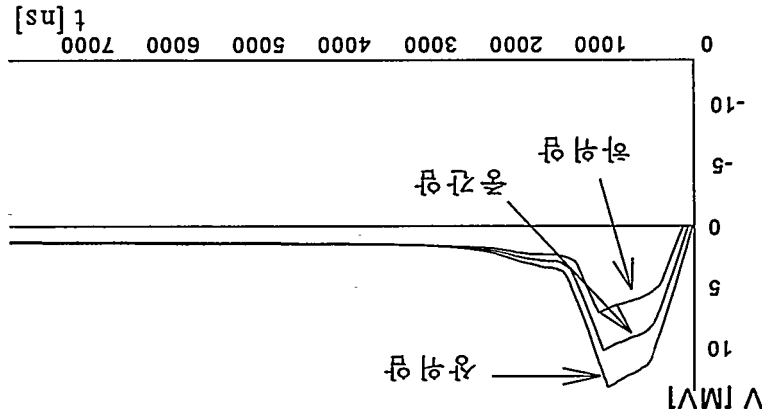
2. 최대 발생 뇌과전압 설계치(안)

여러 조건에 따른 뇌과전압 해석 결과를 토대로 <표 4.6>에 가스절연변전소내 주요 기기에 발생하는 최대 뇌과전압(안)을 도출하였다.

표 4.6 기기별 최대 발생 뇌과전압(안)

피뢰기 특성	변전소 구성	최대 상정 뇌과전압 [kV]		
		분로리액터	개폐장치, 모선	변압기
A	1	2,050	1,790	2,080
	2	1,890	2,020	1,710
	3	1,970	1,810	2,160
B	1	1,900	1,680	1,930
	2	1,800	1,900(1,850)*	1,590
	3	1,830	1,740	2,000
C	1	1,710	1,530	1,760
	2	1,700	1,720	1,430
	3	1,660	1,640	1,860
* () 내는 고속접지스위치의 최대상정뇌과전압으로써, 개방단과 피뢰기 접속지점간의 이격거리는 15 [m] 이내로 설치함을 기준으로 하였다.				

그림 4.9 탐정에 뇌격시 각 아킹홀에 가해지는 뇌과전압



선로의 2상 모델을 도출하기 위해, 각 회선 상도체 6 상 및 가공지선 2조를 고려하여 8 상 모델에 의해 송전선로를 표현하여, 탐정에 뇌격이 가해졌을 때 각 아킹홀에 가해지는 뇌과전압은 <그림 4.9>와 같다.

<그림 4.9>에서 알 수 있는 바와 같이 최상부 아킹홀에 가장 높은 뇌과전압이 가해지므로 선로의 2상 모델은 가공지선(2조를 변류처리)과 최상부 상도체를 고려한 모델을 선택하여 모의한다.

1. 2상 모델 도출

다음과 같다.

등의 여러 요인들의 변화에 따른 기기별 뇌과전압 발생양상에 대한 해석결과

- 상점 뇌격의 특성
- 피뢰기 설치위치 및 특성
- 모의 범위 및 방법

여기에서는 변전소내 뇌과전압 발생에 직접적인 영향을 끼치는

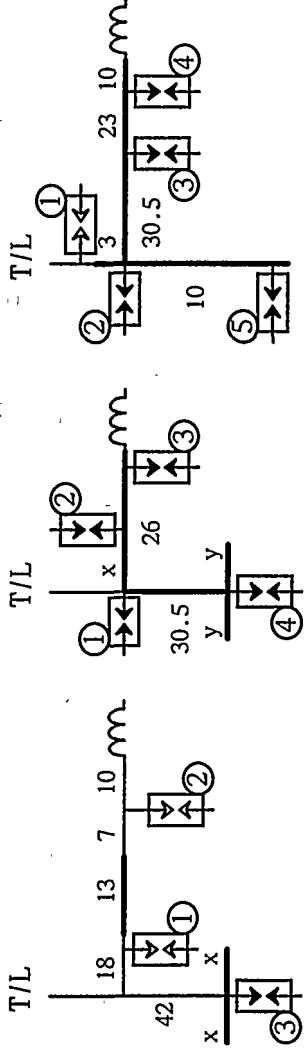
제 3절 가스절연변전소내의 뇌과전압 발생양상

2. 선로 인입부의 피뢰기 설치위치

송전선로부터 변전소로 침입되는 뇌써어지는 일차적으로 변전소의 선로 인입부에 설치된 내뢰설비에 의해 억제되어지므로 선로 인입부의 피뢰기 설치 여건에 따라 침입 뇌써어지의 양상이 상당히 달라지게 된다.

<그림 4.10>에 각 변전소 구성에 대한 선로 인입부 피뢰기 설치 검토위치 및 회로조건을 도시하였으며, <표 4.7>에서 <표 4.9>까지 각 변전소 구성에서 선로 인입부 피뢰기 설치위치에 따른 발생 뇌과전압 해석 결과를 나타내었다.

한편 변전소 구성 2 에서의 효과적인 선로 인입부 피뢰기 설치위치를 선정하기 위해, 가스절연 모선부 개방단 부근 및 선로 인입점과 분포리액터 사이의 중간 부근에 피뢰기를 설치했을 때(<그림 4.10 (나)> 참조), 피뢰기 설치지점에 따른 발생 뇌과전압 변화에 대한 해석 결과를 <그림 4.11>에 도시하였다.



(가) 변전소 구성 1 (나) 변전소 구성 2 (다) 변전소 구성 3

(M : 분포리액터 (distributed reactor) : 가공용 피뢰기 (air terminal) : GIS 용 피뢰기 (GIS arrester))

① ② ③ ④ ⑤ : 피뢰기 설치 검토 위치

그림 4.10 변전소 인입부 피뢰기 설치 위치 검토도

표 4.7 선로 인입부 피뢰기 설치위치에 따른 뇌과전압 (변전소 구성 1)

피뢰기 설치위치	뇌과전압 [kV]		비 고
	분로리액터단	개방단	
①	2,343	3,022	x = 4 m (<그림 4.10 (가)>참조)
②	2,053	3,150	
③	3,380	1,424	
①,②	1,897	3,022	
①,③	2,300	1,391	
②,③	2,049	1,391	
①,②,③	1,895	1,391	x = 10 m
①,②,③	1,894	1,490	
①,②,③	1,892	1,365	x = 15 m

표 4.8 선로 인입부 피뢰기 설치위치에 따른 뇌과전압 (변전소 구성 2)

피뢰기 설치위치	뇌과전압 [kV]		비고
	분로리액터단	개방단	
①	2,108	2,046	y = 4 m
②	1,802	2,140	x = 13 m
③	1,440	2,186	y = 4 m
④	2,337	1,482	y = 4 m
④	3,380	1,424	y = 4 m(SH. R 개방)
③,④	1,364	1,346	y = 4 m
②,④	1,801	1,326	x = 13, y = 4 m
②,④	1,592	1,341	x = 20, y = 4 m
②,④	1,962	1,334	x = 6, y = 4 m
②,④	1,777	1,466	x = 13, y = 10 m
②,④	1,772	1,533	x = 13, y = 15 m

표 4.9 선로 인입부 피뢰기 설치위치에 따른 뇌과전압 (변전소 구성 3)

피뢰기 설치위치	뇌과전압 [kV]	
	분로리액터단	개방단
①	2,477	1,694
②	2,502	1,560
③	2,422	2,289
④	2,031	2,351
⑤	2,363	1,473
②,④	1,830	1,560

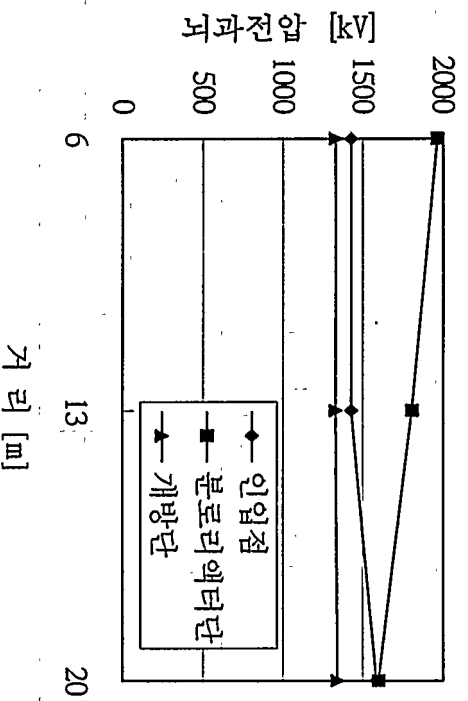


그림 4.11 선로 인입부 피뢰기 설치지점에 따른 뇌과전압
(변전소 구성 2)

<그림 4.11> 의 해석결과에 의하면, 어떤 원인에 의해 분로리액터를 분리하는 경우를 상정하여, 가능하면 분로리액터 분리용 차단기 및 단로기를 분로리액터 쪽에 근접하여 시설하고, 이를 보호하기 위한 피뢰기를 선로 쪽에 설치

하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

국내 765kV 계획 계통에는 2회선 선로가 사용될 예정인데, 2회선 가공선로에서 어떤 상에 지락고장 발생시 타회선에서의 유도전압에 의해 적절한 시간 내에 아크가 소멸되지 않으면 고속재폐로가 곤란해지므로, 이러한 문제점을 해결하기 위해 별도의 장치, 즉 고속접지스위치(HSGS : High Speed Grounding Switch)의 적용이 필요할 수도 있다. <그림 4.12>에 변전소 구성 2 에서 고속접지스위치 적용시에 발생하는 뇌과전압 해석 결과를 도시하였다.

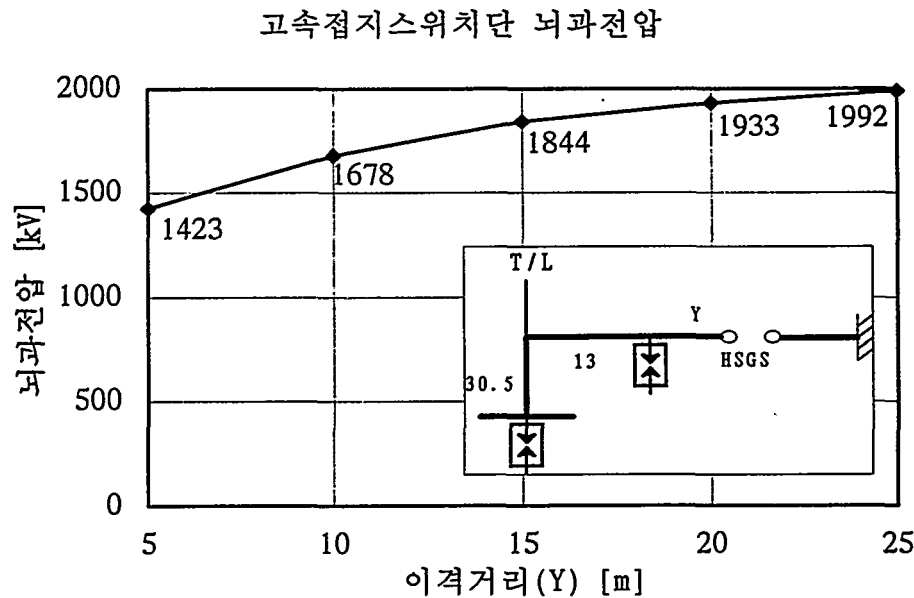


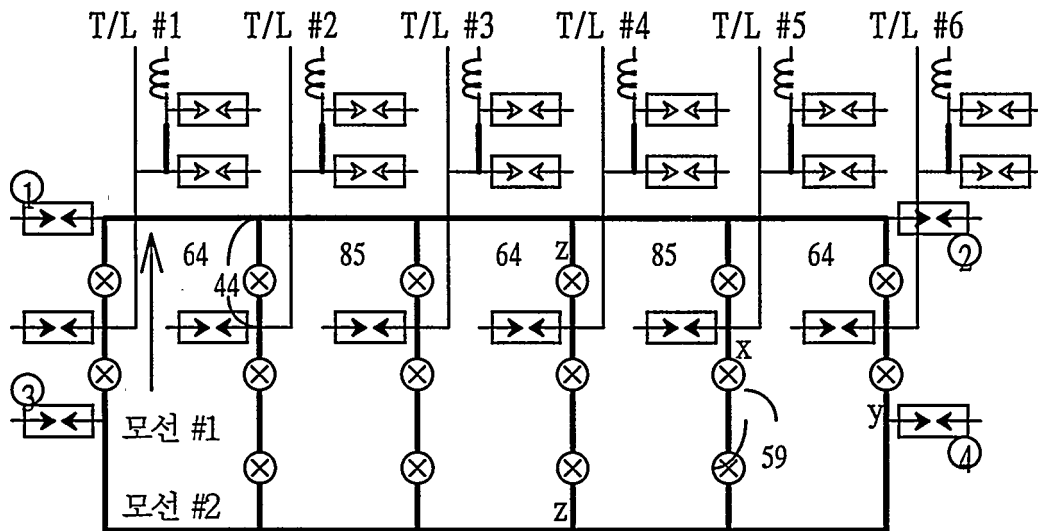
그림 4.12 고속접지스위치에 발생하는 뇌과전압

선로 인입부의 효과적인 뇌과전압 보호를 위해서는 어떠한 변전소 구성에 대해서도 단일 피뢰기의 설치만으로는 곤란하며, 특히 가스절연선로부와 가공선로부가 혼재되어 있는 변전소 구성 1에서는 가공선로와 가스절연선로의 접속부 및 개방단(분로리액터단 및 고속접지스위치단 포함) 부근에 모두 피뢰기를 설치할 경우에만 발생 뇌과전압을 적절한 수준이하로 억제할 수 있다.

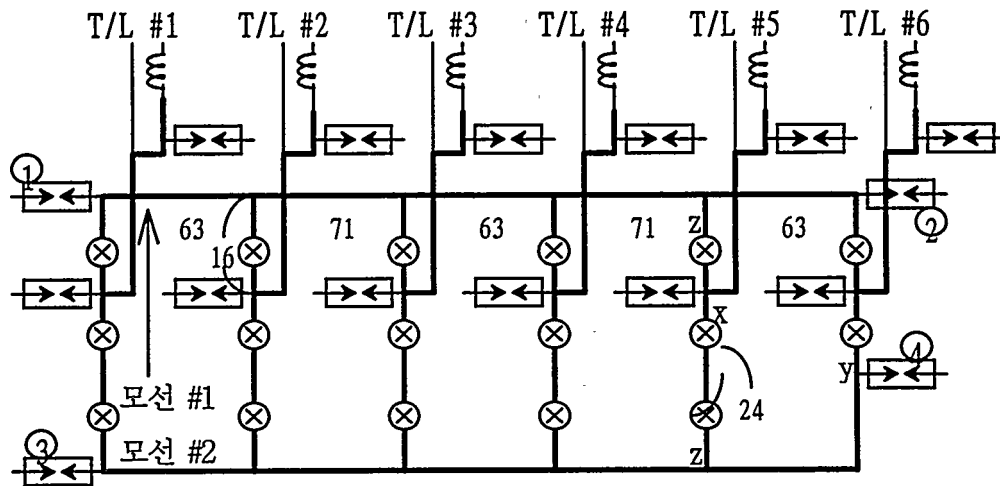
3. 모선 보호용 피뢰기의 설치위치

<그림 4.13>에 각 변전소 구성 (안) 에 대해 가스절연 모선에 발생하는 뇌과전압을 효과적으로 억제하기 위한 피뢰기 설치위치 검토 대상도를 도시하였으며, <표 4.10>에서 <표 4.12>까지 각 구성 (안) 에 대한 뇌과전압 해석 결과를 나타내었다.

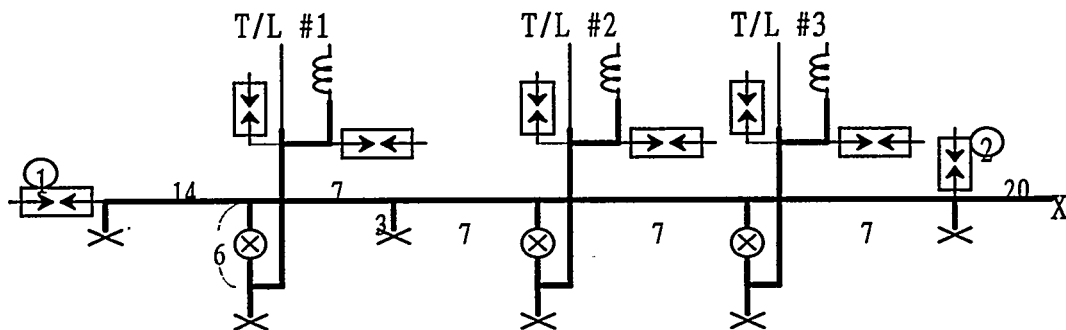
여기에서는 가장 가혹한 경우를 상정하기 위해 <그림 4.13>에서 모선에 1회선의 송전선만 접속되고, 이를 통해 뇌써어지가 침입하는 경우를 대상으로 하였다.



(가) 변전소 구성 1



(나) 변전소 구성 2



(다) 변전소 구성 3

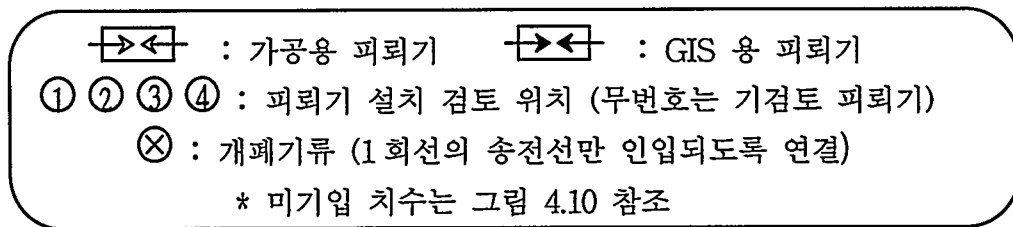


그림 4.13 모선 보호용 피뢰기 설치위치 검토도

표 4.10 모선 보호용 피뢰기 설치위치에 따른 뇌과전압 (변전소 구성 1)

피뢰기 설치위치	회로조건		최대발생 뇌과전압 [kV]	비 고
	모선 #	T/L #		
①	1	1	2,252	$x = 4 \text{ m}$ $y = 4 \text{ m}$ $z = 4 \text{ m}$ (<그림 4.13> 참조)
		2	2,285	
		3	2,260	
		4	2,145	
		5	2,130	
		6	2,192	
④	2	1	1,598	
		2	1,805	
		3	1,975	
		4	2,217	
		5	2,308	
		6	2,267	
①,②	1	1	1,609	
		2	1,676	
		3	1,620	
③,④	2	1	1,591	
		2	1,679	
		3	1,658	
③,④	2	2	1,711	$x = z = 4, y = 10 \text{ m}$
			1,752	$x = z = 4, y = 20 \text{ m}$
			1,730	$x = z = 4, y = 30 \text{ m}$
			1,710	$x = z = 4, y = 59 \text{ m}$
			1,758	$x = y = z = 15 \text{ m}$

표 4.11 모선 보호용 피뢰기 설치위치에 따른 뇌과전압 (변전소 구성 2)

피뢰기 설치위치	회로조건		최대발생 뇌과전압 [kV]	비 고
	모선 #	T/L #		
①	1	1	2,495	x = 4 m y = 4 m z = 4 m (<그림 4.13> 참조)
		2	2,632	
		3	2,609	
		4	2,096	
		5	1,921	
		6	1,659	
④	2	1	1,678	
		2	1,926	
		3	1,995	
		4	2,763	
		5	2,705	
		6	2,486	
①,②	1	1	1,653	
		2	1,853	
		3	1,883	
③,④	2	1	1,642	
		2	1,867	
		3	1,898	
		4	1,891	
		5	1,865	
		6	1,665	
③,④	2	3	1,871	x = z = 4, y = 10
			1,917	x = z = 4, y = 15
			1,912	x = z = 4, y = 24

표 4.12 모선 보호용 피뢰기 설치위치에 따른 뇌파전압 (변전소 구성 3)

피뢰기 설치위치	인입 T/L #	최대발생 뇌파전압 [kV]
①	1	2,090
	2	1,912
	3	1,879
②	1	2,046
	2	1,784
	3	1,873
①,②	1	1,734
	2	1,510
	3	1,590

<표 4.10>에서 <표 4.12>까지 나타낸 해석 결과에 의하면, 모선의 편단에 1 조의 피뢰기 만을 설치한 경우에는 전 범위의 가스절연 모선 및 스위치 기어부를 효과적으로 보호할 수 없음을 알 수 있다. 따라서 가공선로에서 침입되는 뇌찌어지로부터 가스절연 모선 및 스위치 기어부를 효과적으로 보호하기 위해서는 모선의 양단에 피뢰기를 설치하여야 한다. 즉 1½ CB 모선 방식의 경우에는 두 모선 양단에 피뢰기를 설치(모선 보호용으로 총 4 조의 피뢰기를 설치)하고, 2중 모선 4 BUS TIE 방식에서는 모든 BUS TIE 가 개방된 경우를 감안하여 각 모선부의 양단에 피뢰기를 설치(모선 보호용으로 총 8 조의 피뢰기를 설치)하여야 한다.

한편 전체 가스절연 스위치 기어부 및 모선부의 축소에 따른 뇌파전압 감소 효과를 변전소 구성 2 에 대하여 검토한 결과를 <표 4.13> 및 <그림 4.14>에 나타내었는데, 이 때 <표 4.11>에 나타난 해석 결과를 참조하여 J/L #3 을 통해 모선 #2 로 침입하는 경우를 상정하였다.

<표 4.13> 및 <그림 4.14>에 나타낸 해석 결과에 의하면, 발생 뇌파전압의

크기는 모선 길이에 정비례하지 않으나 대략 모선 길이의 감소에 따라 감소하고 있으며, 총 모선길이를 약 100 [m] 이하로 축소하면 뇌파전압 감소 효과도 상당히 커지게 됨을 알 수 있다.

표 4.13 모선부 축소에 따른 뇌파전압 감소 효과(변전소 구성 2)

피뢰기 설치위치	회선 간격 [m]	총모선 길이 [m]	최대발생 뇌파전압 [kV]	비 고
③,④	63 ~ 71	331	1,898	<그림 4.11> 참조
	50	250	1,864	회선간격 균일 가정
	40	200	1,856	"
	30	150	1,819	"
	20	100	1,710	"
	10	50	1,619	"

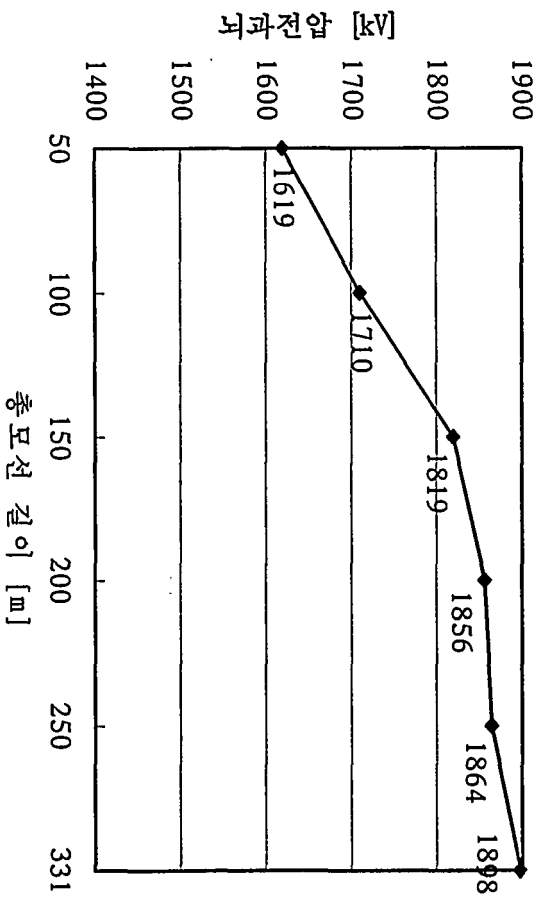


그림 4.14 모선 길이 축소에 따른 뇌파전압 감소 효과 (변전소 구성 2)

4. 변압기 보호용 피뢰기의 설치위치

선로 인입부 및 모선 양단에 설치된 피뢰기에 의해서는 변압기단에 발생되는 뇌과전압을 효과적으로 억제할 수 없기 때문에 변압기 보호용 피뢰기를 반드시 설치하여야 한다.

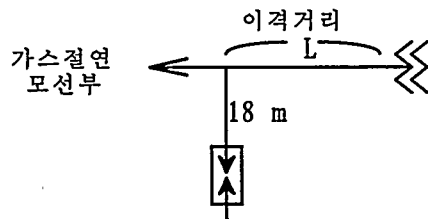
변압기 보호용 피뢰기의 변압기 보호 효과는 설치되는 피뢰기의 제한 전압-전류 특성과 변압기와 피뢰기 간의 이격거리에 가장 큰 영향을 받게 된다.

변압기 보호용 피뢰기 설치검토도를 <그림 4.15>에 나타내었는데, 변전소 구성 1 및 변전소 구성 3 은 가스절연 모선 및 스위치 기어부로부터 가공선로를 인출하여 변압기가 연결되므로 가공용 피뢰기에 의해 변압기를 보호하는 방안에 대해 검토하였으며, 변전소 구성 2 는 가스절연선로에서 직접 변압기가 접속되므로 GIS 용 피뢰기에 의해 변압기를 보호하는 방안에 대해 검토하였다. 또한 비교적 가혹한 조건을 상정하기 위해 대상 변전소는 단일 회선, 단일 모선 및 단일 뱅크의 변압기가 운전중인 것으로 가정하였으며, 변전소 구성 1 및 2 (1½ CB 모선 방식) 에서는 침입 뇌찌어지의 억제 및 감쇠가 적은 경우를 상정하기 위해 모선 #2 를 통해 변압기가 접속된 경우를 대상으로 하였고, 변전소 구성 3 (2중모선 4 BUS_TIE 방식) 에서는 동일한 조건이 되므로 모선 #1 을 통해 변압기가 접속되는 경우를 대상으로 하였다.(<그림 4.5>에서 <그림 4.7> 까지 참조)

각 변전소 구성 (안) 에 대해, 변전소 회로조건 및 변압기 보호용 피뢰기와 변압기 간의 이격거리에 따른 발생 뇌과전압 해석 결과를 <표 4.14>에서 <표 4.16>까지 및 <그림 4.16>에 나타내었다.

표 4.14 변압기단 뇌과전압 (변전소 구성 1)

피뢰기 이격거리 [m]	뇌써어지 인입 T/L #	대상 TR. #	변압기단 뇌과전압 [kV]
44	1	1	1,539
		2	1,644
		3	1,781
		4	1,932
	2	1	1,488
		2	1,741
		3	1,834
		4	1,920
	3	1	1,725
		2	1,586
		3	1,799
		4	1,816
30	1	4	1,843
20			1,763
10			1,684



(가) 가공용 피뢰기 설치위치
(변전소 구성 1, 3)



(나) GIS 용 피뢰기 설치위치
(변전소 구성 2)

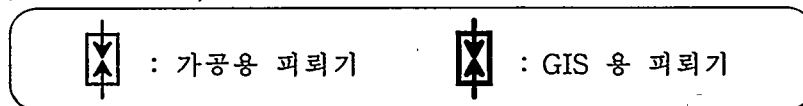


그림 4.15 변압기 보호용 피뢰기 설치위치 검토도

4.15 변압기단 뇌과전압 (변전소 구성 2)

피뢰기 이격거리 [m]	뇌써어지 인입 T/L #	대상 TR. #	변압기단 뇌과전압 [kV]
15	1	1	1,495
		2	1,403
		3	1,372
		4	1,354
		5	1,549
	2	1	1,444
		2	1,476
		3	1,422
		4	1,395
		5	1,553
	3	1	1,436
		2	1,484
		3	1,326
		4	1,476
		5	1,521
	6	1	1,534
		2	1,583
		3	1,389
		4	1,372
		5	1,404
10	6	2	1,520
20			1,635
25			1,678
30			1,718

표 4.16 변압기단 뇌과전압 (변전소 구성 3)

피뢰기 이격거리 [m]	뇌써어지 인입 T/L #	대상 TR. #	변압기단 뇌과전압 [kV]
10	1	1	1,866
		2	1,840
	2	1	1,870
		2	1,847
	3	1	1,859
		2	1,860
20	1	1	2,011
		2	2,012
	2	1	2,022
		2	2,004
	3	1	2,024
		2	2,005

해석결과에 의하면 변압기 보호용 피뢰기와 변압기 간의 이격거리가 멀어지게 되면 피뢰기에 의한 뇌써어지 억제 효과가 감소됨을 알 수 있다. 따라서 변압기 보호용 피뢰기와 변압기 간의 이격거리는 가능한 줄이는 것이 바람직 한데, 변전소 구성 1 및 구성 3 (안)은 변압기가 가스절연부에 직접 접속되지 않고 가공선로를 통해 접속되기 때문에 피뢰기 이격거리를 줄이는 데에는 한 계가 따르게 된다. 변전소 구성 2에서는 가스절연선로에서 직접 변압기가 접 속되므로 이러한 피뢰기 설치 이격거리 제한을 덜 받게 되어 피뢰기와 변압기 간의 이격거리를 충분히 줄일 수 있다.

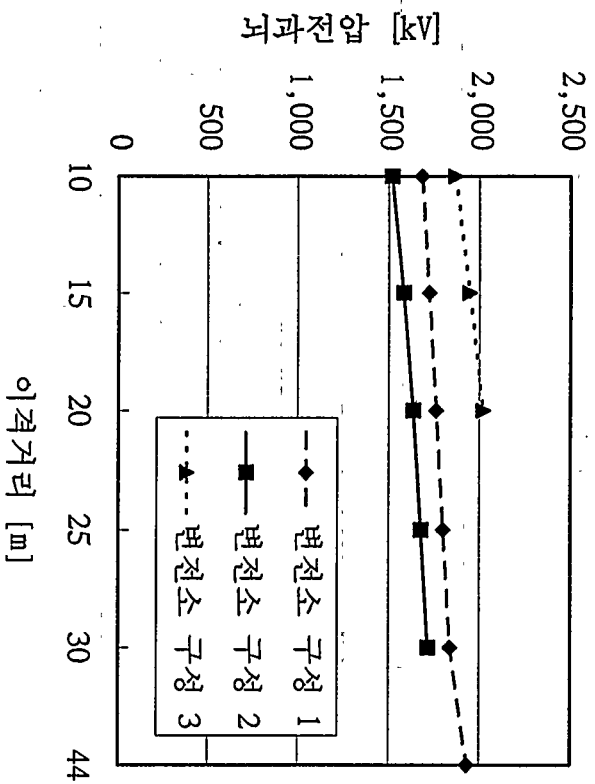


그림 4.16 피뢰기 이격거리에 따른 변압기단 뇌파전압

한편 변전소 구성 3 (2중모선 4 BUS_TIE 방식) 에서는 다른 구성 (안) 에 비해 다소 높은 뇌파전압이 발생되었는데, 이는 변전소 구성 상태의 차이에 의한 써어지의 투반사 영향에 의한 것으로 사료된다. 따라서 변전소 구성, 피뢰기 설치위치 및 이격거리 등에 의한 뇌파전압 발생양상이 상당한 차이를 나타내므로, 변전소 구성 및 각종 기기 배치 결정시에 이러한 사항들을 반드시 고려하는 것이 바람직하다.

5. 뇌격전류의 크기 및 파형의 영향

뇌격전류의 크기 및 파두장의 변화에 따른 변전소내 뇌파전압 변화를 <표 4.17>에 나타내었으며, 이 때 회로조건은 다음과 같다.

- 회로조건 1 : 선로 인입부 피뢰기 설치위치 검토 회로
- 회로조건 2 : 모선 보호용 피뢰기 설치위치 검토 회로

- 회로조건 3 : 변압기 보호용 파뢰기 설치위치 검토 회로

해석결과에 의하면, 파두장이 길어지거나 크기가 작아지면 변전소내 뇌과전압은 감소하는데, 특히 파두장이 길어지면 뇌과전압의 감소효과가 비교적 큰 폭으로 나타나므로, 절연협조설계시에는 이를 감안하여 국내 뇌격 특성에 적합한 적정 뇌격 파형을 상정하는 것이 바람직하다.

표 4.17 뇌격전류 변화에 따른 뇌과전압

변전소 구성	뇌격전류 (파형 [μ s], 크기 [kA])	뇌과전압 [kV]			
		회로조건 1		회로조건 2	회로조건 3
		분로리액터	개방단	모선부	변압기단
1	1/70, 170	1,895	1,391	1,676	1,932
	2/70, 170	1,736	1,318	1,497	1,804
	1/70, 150	1,848	1,360	1,590	1,864
	2/70, 150	1,643	1,305	1,350	1,557
2	1/70, 170	1,801	1,326	1,898	1,583
	2/70, 170	1,513	1,285	1,540	1,511
	1/70, 150	1,741	1,305	1,774	1,559
	2/70, 150	1,331	1,260	1,330	1,356
3	1/70, 170	1,830	1,560	1,734	2,024
	2/70, 170	1,643	1,354	1,409	1,839
	1/70, 150	1,793	1,496	1,691	1,902
	2/70, 150	1,567	1,363	1,414	1,523

6. 피뢰기 특성의 영향

<표 4.18> 및 <그림 4.17>에 피뢰기의 특성에 따른 뇌과전압 억제 효과를 나타내었는데, 피뢰기 특성 A 는 현재 JEC-203 규격에 정의되어 있는 500 kV 계통용 피뢰기 방전특성을 국내 765kV 계획 계통용 피뢰기에 선형적으로 확대 적용한 것이며, 피뢰기 특성 B 및 C 는 현재 피뢰기 성능의 발전 추이를 감안하여 개발 가능한 특성(일본 1,000kV 계통 검토시 적용한 값임)을 나타낸 것이다. 또한 피뢰기 특성 D 는 미국 AEP 765kV 계통에 사용중인 정격전압 588kV(IEC 규격에는 표준값으로 정해지지 않은 값이며, IEEE 규격에는 표준값으로 명시하고 있는 피뢰기 정격전압이다.) 피뢰기의 전압-전류 특성을 나타낸 것이다. 변전소 구성 2 의 경우에는 현재 800kV 급 계통에 적용중인 여러가지 피뢰기 특성에 따른 뇌과전압 변화 및 고속접지개폐기 적용시의 뇌과전압 변화를 추가로 검토하였다.

해석결과에 의하면 우수한 보호성능을 가진 피뢰기를 사용하면 발생 뇌과전압을 대폭 억제할 수 있으며, 특히 피뢰기에 의해 직접적으로 보호받게 되는 분로리액터나 변압기 등에 가해지는 뇌과전압 억제에 매우 효과적임을 알 수 있다. 따라서 765kV 계통에서는 보호성능이 향상된 피뢰기를 적극적으로 도입하는 것이 매우 바람직하다.

EHV 또는 UHV 계통에 사용되는 피뢰기의 방전내량은 주로 개폐꺼저기에 의해 결정되어지는데, 여기에서는 참고적으로 변전소 구성 2 에서의 뇌꺼저기에 대한 피뢰기 흡수 에너지를 <표 4.19>에 나타내었다. 해석결과에 의하면 보호레벨이 낮은, 즉 동일한 방전전류에 대해 제한전압이 낮은 피뢰기는 썩어지 전압 억제효과는 뛰어나나, 보다 많은 양의 에너지를 방출할 수 있어야 됨을 알 수 있다.

표 4.18 피뢰기 특성 변화에 따른 뇌과전압

변전소 구성	피뢰기 특성	뇌과전압 [kV]			
		회로조건 1		회로조건 2	회로조건 3
		분로리액터	개방단*	모선부*	변압기단*
1	A	2,050	-	1,793	2,075
	B	1,895	-	1,676	1,932
	C	1,712	-	1,532	1,763
	D	1,930	-	1,659	1,937
2	A	1,899	1,741	2,015(1,835)	1,711(1,710)
	B	1,801	1,678	1,898(1,757)	1,589(1,577)
	C	1,702	1,585	1,721(1,625)	1,429(1,422)
	D	1,822	1,665	1,877(1,741)	1,596(1,599)
	E	1,792	1,661	1,867(1,739)	1,563(1,557)
	F	1,826	1,688	1,916(1,774)	1,613(1,608)
	G	1,921	1,742	2,007(1,852)	1,740(1,739)
	H	2,025	1,790	2,061(1,917)	1,893(1,897)
	I	2,081	1,778	2,081(1,877)	1,753(1,751)
3	A	1,969	1,567	1,805	2,160
	B	1,830	1,560	1,734	2,024
	C	1,662	1,550	1,636	1,864
	D	1,860	1,556	1,725	2,031
* 개방단은 분로리액터가 설치 위치에 고속접지스위치가 설치된 경우의 고속접지스위치단을 나타내고, () 내의 값은 고속접지스위치가 설치된 경우의 값을 나타내고 있다.					

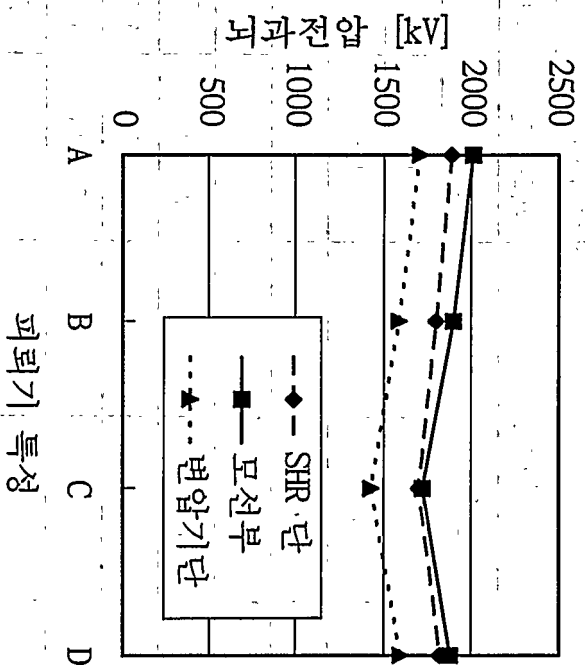


그림 4.17 피뢰기 특성에 따른 뇌피전압 변화 예(변전소 구성 2)

표 4.19 뇌색어지에 대한 피뢰기 흡수 에너지(변전소 구성 2)

피뢰기 특성	흡수 에너지 [kJ]		
	인입부	모선부	변압기단
A	62.86	64.62	64.19
B	66.48	66.68	66.80
C	72.36	69.07	70.05
D	65.14	61.74	60.98

7. 탐각 저항의 영향

<표 4.20> 및 <그림 4.18> 에 탐각저항의 변화에 따른 뇌과전압 해석결과를 나타내었으며, 탐각저항이 작아지면 발생 뇌과전압의 크기도 줄어드나, 실용적인 범위(대략 20 Ω 이하)에서는 그 영향이 작음을 알 수 있다.

표 4.20 탐각저항 변화에 따른 뇌과전압

변전소 구성	탐각저항 [Ω]	뇌과전압 [kV]			
		회로조건 1		회로조건 2	회로조건 3
		분로리액터	개방단	모선부	변압기단
1	5	1,886	1,382	1,638	1,897
	10	1,895	1,391	1,676	1,932
	15	1,904	1,397	1,703	1,956
	20	1,910	1,401	1,720	1,974
2	5	1,788	1,322	1,861	1,580
	10	1,801	1,326	1,898	1,583
	15	1,810	1,332	1,925	1,586
	20	1,818	1,340	1,943	1,589
3	5	1,825	1,543	1,722	1,998
	10	1,830	1,560	1,734	2,024
	15	1,836	1,569	1,743	2,048
	20	1,841	1,574	1,750	2,069

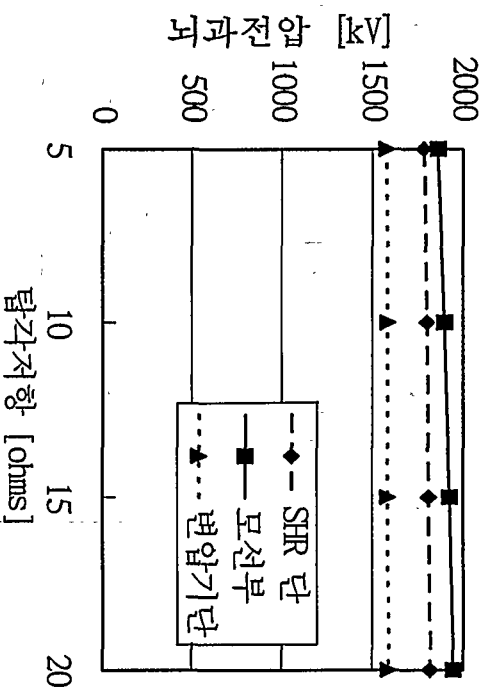


그림 4.18 타격저항에 따른 뇌파전압 변화 예(변전소 구성 2)

8. 가스절연모션 써어지 임피던스의 영향

가스절연모션의 써어지 임피던스는 가스절연 모션의 단면 형상, SF₆ 가스 및 스페이서를 포함하는 내부 충전물의 유전 특성 등에 따라 달라지게 되는데, 현재 국내 765kV 계획 변전소의 가스절연 모션에 대한 구체적인 형상이 정해져 있지 않으므로, 여기에서는 가스절연모션의 일반적인 써어지 임피던스 범위인 50~80 Ω(일반적으로 가공선로의 써어지 임피던스는 약 300~400 Ω이며, 지중 케이블의 써어지 임피던스는 대략 30~50 Ω 정도의 범위를 가진다.) 에 대한 뇌파전압 발생 양상 변화를 검토하였다.

<표 4.21> 및 <그림 4.19>에 해석 결과를 도시하였으며, 해석 결과에 의하면 가스절연모션의 써어지 임피던스가 커지면 발생 뇌파전압도 다소 커지게 되나, 가스절연모션의 써어지 임피던스의 증가에 따라 뇌파전압이 일률적으로 증가되지는 않는다.

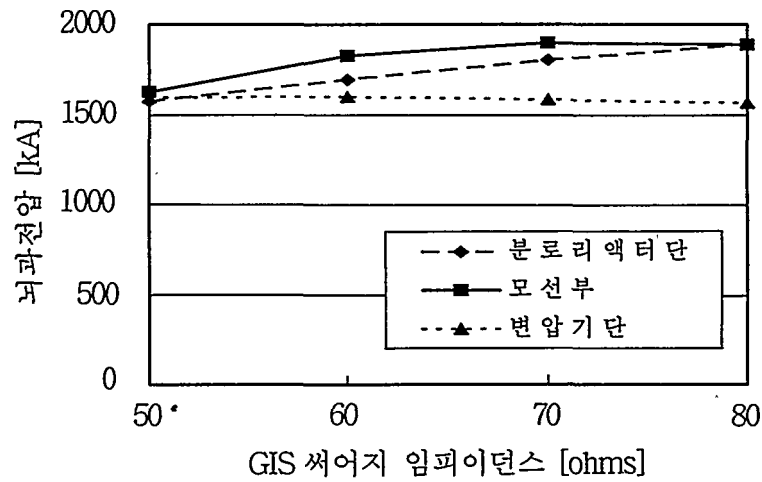


그림 4.19 가스절연모선 써어지 임피던스에 따른 뇌과전압 변화 예(변전소 구성 2)

표 4.21 GIS 써어지 임피던스에 따른 뇌과전압

변전소 구성	써어지 임피던스 [Ω]	뇌과전압 [kV]		
		회로조건 1	회로조건 2	회로조건 3
		분로리액터	모선부	변압기단
1	50	1,916	1,569	1,895
	60	1,898	1,621	1,928
	70	1,895	1,676	1,932
	80	1,892	1,695	1,921
2	50	1,575	1,624	1,594
	60	1,695	1,826	1,598
	70	1,801	1,898	1,583
	80	1,889	1,888	1,562
3	50	1,823	1,476	2,046
	60	1,835	1,624	2,036
	70	1,830	1,734	2,024
	80	1,817	1,808	2,007

9. 교류 전압 중첩의 영향

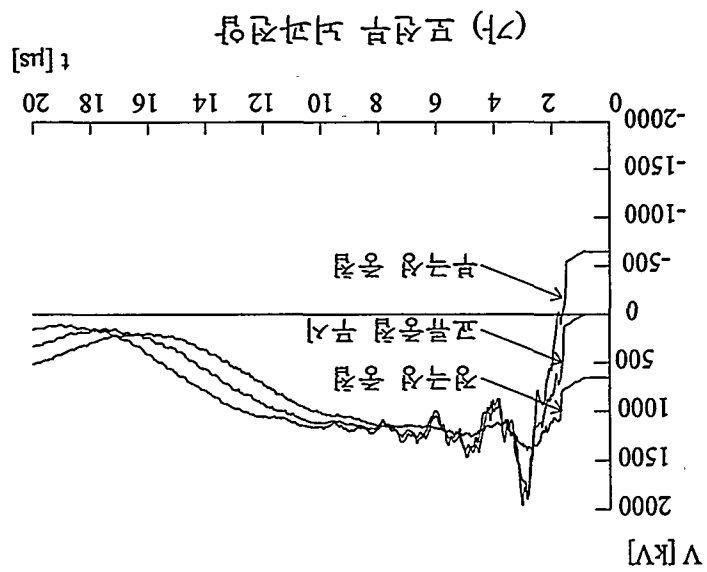
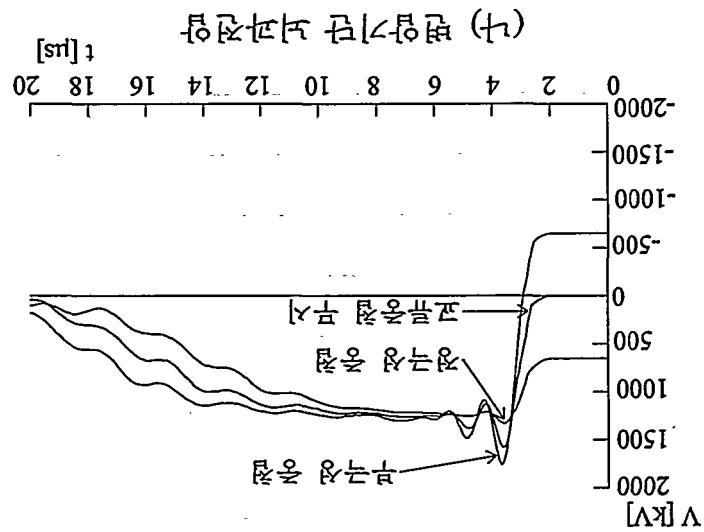
<표 4.22> 및 <그림 4.20> 에 상용주파 교류전압을 고려한 경우의 뇌써어지 전압 해석결과를 나타내었으며, 이 때 중첩되는 상용주파 전압 파고치는 653.197 kV ($= 800 \times \sqrt{2}/\sqrt{3}$) 으로 가정하였으며, 뇌격은 상용주파 교류전압 파고시점에 가해지는 것으로 모의하였다.

해석결과에 의하면, 일반적으로 반대극성의 교류전압이 중첩된 경우의 뇌과전압이 가혹하게 발생되나, 계통 구성 조건에 따라 써어지의 투반사 형태가 달라지므로 부극성 교류중첩시 반드시 가혹한 조건이 되는 것은 아님을 알 수 있다.

표 4.22 상용주파 교류전압 중첩에 따른 뇌과전압

변전소 구성	상용주파 교류전압 중첩여부	뇌과전압 [kV]		
		회로조건 1	회로조건 2	회로조건 3
		분로리액터	모선부	변압기단
1	무시	1,895	1,676	1,932
	동극성	1,424	1,376	1,321
	반대극성	2,268	1,879	1,587
2	무시	1,801	1,898	1,583
	동극성	1,636	1,411	1,330
	반대극성	1,758	1,962	1,756
3	무시	1,830	1,734	2,024
	동극성	1,416	1,472	1,571
	반대극성	2,034	1,534	2,450

그림 4.20 교류전압 중첩에 따른 뇌과전압 파형 예 (변전소 구성 2)



10. 철탑 경간의 영향

철탑 경간이 변전소내에 발생하는 뇌과전압에 영향을 끼치게 되는 시점은, 가공선로의 썩어지 전파속도를 광속 (= 300 m/s) 으로 가정하면 대략 $(2 \times \text{경간 [m]} / 300 [\mu\text{s}])$ 이후 시점이 되는데, 제 1 철탑 역섬락에 의해 변전소내에 발생하는 뇌과전압의 파고치는 매우 급준한 파형이 되어 파두장이 2 $[\mu\text{s}]$ 이내가 되므로, 철탑 경간이 300 [m] 이상이 되면 철탑 경간에 의한 변전소내 발생 뇌과전압의 파고치의 영향은 받지 않게 된다.

표 4.23 제 1 철탑과 인유철구간 거리에 따른 뇌과전압

변전소 구성	제 1 철탑↔ 인유철구간 거리 [m]	뇌과전압 [kV]		
		회로조건 1	회로조건 2	회로조건 3
		분로리액터단	모선부	변압기단
1	50	1,861	1,691	1,919
	100	1,895	1,676	1,932
	150	1,909	1,682	1,896
	200	1,916	1,606	1,831
2	50	1,757	1,956	1,587
	100	1,801	1,898	1,583
	150	1,808	1,734	1,559
	200	1,805	1,526	1,564
3	50	1,806	1,705	2,096
	100	1,830	1,734	2,024
	150	1,838	1,743	1,998
	200	1,841	1,741	1,958

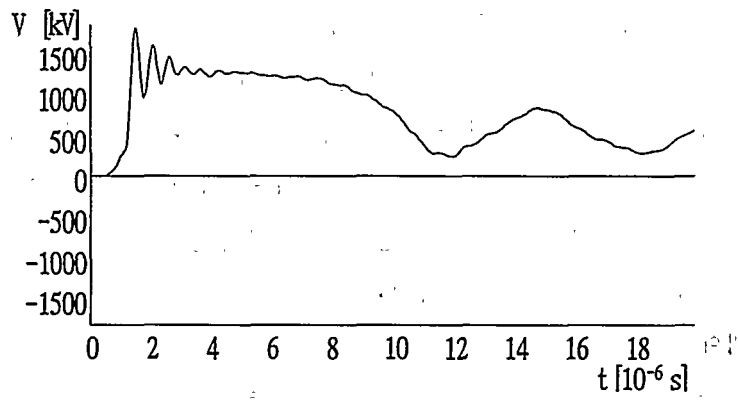
국내 765kV 계획 송전선로의 철탑 경간은 대략 400 [m] 이상이 될 것으로 예상되므로, 철탑 경간에 의한 뇌과전압 크기 변화는 없을 것으로 추정된다. 그러나 제 1 철탑과 인유철탑구 간의 거리는 변전소내 뇌과전압 발생 양상에 직접적인 영향을 끼치게 되므로, 여기에서는 제 1 철탑과 인유철탑구 간의 거리 범위를 50 ~ 200 [m] 에 대해 변전소내 뇌과전압 발생 양상을 검토하였으며, <표 4.23>에 해석 결과를 나타내었다.

해석 결과에 의하면 제 1 철탑과 인유철탑구간 거리에 따른 발생 뇌과전압 변화는 그다지 크지 않으나, 변전소 구성 2 에서는 모선부에 발생하는 뇌과전압은 거리가 멀어지게 되면 현저하게 낮아지고 있음을 알 수 있다.

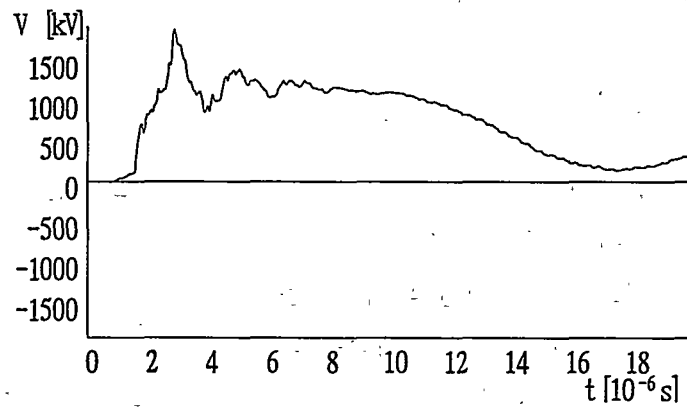
11. 발생 뇌과전압의 파두장

<그림 4.23>에, 변전소 구성 2 에서 분로리액터단, 가스절연 모선부 및 변압기단에 가해지는 뇌과전압 파형 예를 도시하였다.

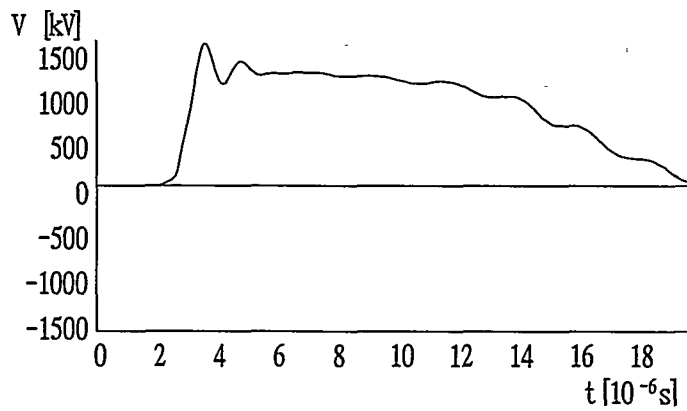
역섬락에 의해 상도체에 침입한 뇌써어지는 매우 급준한 파형이 되는데, 인입 선로에 직결된 분로 리액터에 발생하는 뇌과전압은 파두장이 1 μ s 내외의 매우 빠른 상승률을 갖게 되며, 가스절연 모선부에 발생하는 뇌과전압은 가스절연 모선의 길이가 길어지면 상승률이 완만해지는 경향을 보이고, 또한 변압기단에 발생하는 뇌과전압의 파두장은 약 2 μ s 정도로서 인입 써어지의 상승률이 다소 완화된 것을 알 수 있다.



(가) 분로리액터단



(나) 모선부



(다) 변압기단

그림 4.23 변전소내 발생 뇌과전압 파형 예 (변전소 구성 2)

제 4 절 결 과 검 토

상기 해석 결과에서 알 수 있듯이 변전소 뇌파전압 발생에 비교적 큰 영향을 미치는 요인으로는

- 피뢰기의 제한전압-전류 특성
- 피뢰기의 설치위치 및 설치 횟수
- 변전소 모선의 구성
- 변전소 모선의 길이
- 피뢰기와 피보호기기 간의 이격거리

등이 있다. 특히 765kV 급 GIS 변전소는 345kV 급 GIS 변전소에 비해 규모가 매우 커지므로 인해 피뢰기의 설치위치와 피보호기기 간의 이격거리가 비교적 멀어진다. 따라서 피뢰기에 의한 효과적인 뇌파전압 억제를 위해서 피뢰기 설치위치에 대한 세심한 주의가 필요하다.

개방된 선로인 경우(회로조건 1)에서는 선로 인입단에 1조의 피뢰기 설치에 의해서는 전 구간을 피뢰기 보호 범위 내에 둘 수 없으므로 전 범위를 피뢰기 보호범위 내에 들도록 하기 위해서는 추가의 피뢰기 설치가 필요하게 된다. 특히 현행 345kV 계통의 표준 변전소를 확대 적용한 1½ CB 모선방식 I 에서는 가공선로가 모선부까지 접속되기 때문에 피뢰기에 의한 효과적인 뇌파전압 억제에 어려움이 따르게 되고, 또한 피뢰기와 피보호기기 간의 이격거리도 멀어짐으로 인해 피보호기기에 가해지는 뇌파전압은 피뢰기의 제한 전압을 훨씬 초과하게 된다. 1½ CB 모선방식 II 는 이러한 불리한 점을 개선한 것으로써, 모선부에서의 선로 인출구간을 가스절연선로로 구성하여 전체 모선 및 스위치 기어부를 대폭 축소시킴과 동시에 피뢰기의 설치 위치를 피뢰기 호기기에 근접하여 설치함으로써 피보호기기에 가해지는 뇌파전압을 피뢰기의 제한 전압 수준을 약간 상회하는 정도까지 억제할 수 있다.

변전소 모선에 가장 가혹한 뇌파전압이 발생하게 되는 경우(회로조건 2)에

서는 모선 및 스위치류 보호를 위한 피뢰기를 모선 양단에 설치하는 경우에도 모선 길이가 매우 길어지게 되면 모선 중앙부근에 높은 뇌파전압이 발생하게 되므로 모선 길이를 단축하거나 모선 중앙 부근에 추가의 피뢰기를 설치하여야 하는 경우가 발생할 수도 있다. 그러나 가스절연 변전소의 장점 중의 하나인 변전소의 축소화를 최대한 활용하는 방안에 의해 모선 및 스위치 기어부를 단축함으로써 이러한 문제점은 해결될 수 있는데, 이 때에도 1½ CB 모선 방식 II 의 경우처럼 모선부에서의 선로 인출 구간을 가스절연선로로 구성하는 방법이 바람직하리라 생각된다. 또한 모선 보호용 피뢰기의 보호범위는 전체 모선 구간 중에서 특히 모선 개방단(단로기 설치지점)이 되므로 가능하면 피뢰기 설치점을 단로기에 근접시키는 것이 요구된다.

변압기단에 가해지는 뇌파전압에 지대한 영향을 끼치는 변압기 보호용 피뢰기와 변압기간의 이격거리도 가능한 줄이는 것이 바람직한데, 이에 대해서는 가스절연선로에 변압기를 직결한 1½ CB 모선 방식 II 의 방법이 이격거리를 가장 줄일 수 있어서 뇌파전압 억제면에서 매우 유리하다.

따라서 변전소내 각종 기기의 뇌쇄어지에 대한 효과적인 보호를 위해서는, 변전소 구성 및 기기 배치, 인접 가공선로 및 철타 조건, 상정 뇌격 조건 등의 제반조건을 고려한 뇌파전압 발생양상을 토대로, 피뢰기 등을 이용한 뇌파전압 억제방안을 적극 적용하는 것이 바람직하다.

제 5 장 765kV 송전선로의 절연설계

765kV 송전계통은 대용량 전력수송을 목적으로 하고 있으므로 신뢰성 향상이 요구되며, 지지물의 대형화, 선로경과지 여건의 악화 등에서 비롯되는 건설비의 상승등을 최대한 억제할 수 있어야 한다. 그러므로 송전선로 설계의 기본적인 자료를 제시하는 절연설계는 상기 두가지 조건을 만족할 수 있도록 합리적으로 검토되어야 한다. 송전선로 절연설계는 송전선로가 경과하는 지역의 자연환경이 송전선로의 절연에 미치는 영향 및 계통 내.외부의 과전압을 검토하여 적절한 수준의 신뢰성이 유지될 수 있도록 소요에자수량, 소요 Clearance, 탐각절지저항 및 차폐각 등의 절연요소들을 산출하여 결정하는 것이다.

본 검토에서는 765kV 계획 송전선로에 대하여, 내부과전압으로서 상용주파성 교류과전압, 개폐과전압에 대한 검토 결과로부터 내전압목표치를 선정하였다. 이에 대한 절연요소로서 상용주파 교류과전압에 대한 공기절연간격(Air Gap) 및 애자련의 섬락특성에 관하여 검토하였으며, 개폐과전압에 대한 아킹흔, 공기절연 간격 및 애자련의 대지간 및 상간 섬락특성에 관하여 검토하였다. 외부과전압으로서 뇌과전압에 대하여는 뇌의 특성과 역섬락 및 차폐실패에 의한 뇌사고 현상에 대하여 검토하였으며, 뇌사고에 대한 국내의 자료를 이용하여 적절한 수준의 뇌사고율 목표치를 선정하였다. 이에 대한 절연요소로서 아킹흔간격, 탐각절지저항 및 가공지선 위치와 사고율의 관계를 검토하였다.

이상의 각각에 대한 검토를 기초로하여 상용주파과전압에 대한 절연설계 결과와 개폐과전압에 대한 절연설계 결과 및 뇌과전압에 대한 절연설계 결과를 상호 비교하여 765kV 송전선로의 절연설계(안)을 작성하였다.

제 1 절 상용주파 일시과전압에 대한 절연설계

1. 개 요

상용주파 과전압에 대한 절연시 고려할 요소로는 애자 및 공기절연 특성이 있다. 애자는 지역 및 기상조건의 영향을 직접 받으며, 애자표면의 오손 및 적설 등으로 인하여 절연능력이 크게 저하되는 특성이 있다. 공기절연은 강풍등으로 인하여 선로의 애자장치나 Jumper가 횡진시 각종 섬락 경로에 대하여 검토한 후, 이 결과를 Clearance 설계에 반영하도록 한다.

애자의 절연특성에는 자체의 절연능력, 오손특성, 섬락특성, 적설애자련의 섬락특성 등이 있다. 또한 검토 대상 애자로는 자기(Porcelain)애자, 유리(Glass)애자 및 고분자복합(Polymer)애자 등이 있으나, 본 검토에서는 우리나라에서 주로 사용되고 있는 자기애자에 대하여 검토한 결과위주로 하고 유럽지역에서 많이 사용하고 있는 유리애자에 대하여 검토 하였다. 또한 이들에 대한 국내 규격이나 제품이 없으므로 IEC, ANSI, JIS 등 외국의 규격을 참조하였다.^[20,21,22,23,24]

애자의 오손특성에 관한 검토사항으로는 오손도의 측정방법, 애자의 자연오손 특성 및 오손에 따른 지역구분 등이 있으며, 이에 대하여 국내의 연구결과^[25] 및 외국자료^[24,26]를 참조하여 검토하였다.

애자의 섬락특성에 대한 검토사항으로는 Clean-fog법등의 인공오손시험과 자연오손시험에 의한 섬락특성 및 애자의 연결 갯수당 내전압 특성 등이 있다. 이러한 특성들은 애자의 재질 및 제조업체에 따라 다르며, 765kV 선로에 사용 가능한 고강도 애자의 섬락특성 관련자료가 부족하므로 외국의 시험 자료^[23,27]를 이용하여 검토하였다.

선로가 적설이 심한 지역을 통과하는 경우의 내장애자련은 적설로 인하여 섬락전압이 저하하게 되므로 적설지역 구분방법과 적설애자련의 섬락특성을 외국의 자료^[28,29]를 이용하여 검토하였다.

공기절연의 섬락특성에 대하여는 건조, 주수 및 농무중의 섬락특성에 대한 외국의 시험결과^[28,29]를 이용하여 검토하였다.

2. 765kV 송전선로의 상용주파 과전압 절연설계

가. 절연설계 방법

에자의 상용주파과전압 절연설계는 우선 Stress에 해당하는 내전압 목표치를 선정하고, 이에 대한 Strength로서 오손 및 적설을 고려한 에자의 내전압특성과 Air Gap의 섬락특성을 이용하여 에자의 규격 및 소요수량을 결정하고 공기절연 이격거리를 산출하는 방법을 사용한다. <그림 5.1>은 오손에 대한 소요에자수량의 결정순서를 나타낸 것이다.

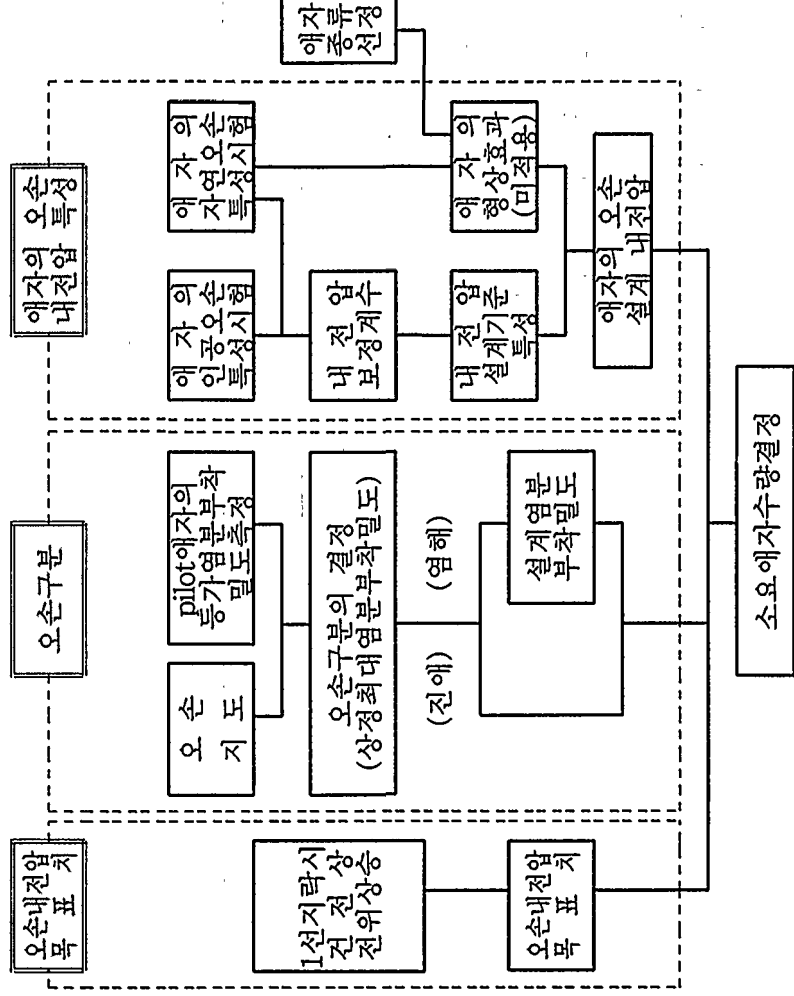


그림 5.1 내오손 설계에 의한 소요 에자수량 결정 순서

나. 절연설계의 조건

(1) 오손지역구분

오손지역구분에 대하여는 765kV 송전선로 예정 경과지의 많은 부분이 산악지역과 같이 염해의 영향은 거의 받지않고 단지 먼지등에 의한 매우 가벼운 오손만 받는 지역을 통과하는 것을 감안하여, <표 부2.2>의 우리회사 오손지역구분 중에서 청정지역을 <표 5.1>과 같이 "청정 I 지역" 및 "청정 II 지역"으로 세분하여 검토하였다. 또한 <표 부2.6>에서와 같이 자연조건에서 애자에 부착되는 염분의 밀도는 애자의 형상에 따라 다르나 실제 선로에 있어서 철탑의 위치, 측정시기 등에 따라 변화가 다양하므로 그 최대치를 찾아 형상효과를 적용하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 검토에서는 애자의 형상효과에 대하여는 고려하지 않는 것으로 하였다.

표 5.1 오손구분에 대한 상정 최대 염분 부착밀도

구 분	청정 I	청정 II	A	B	C	D
등가염분부착밀도 (mg/cm ²)	0.01	0.03	0.063	0.125	0.25	0.5

* 12톤 현수애자 하면의 염분 부착치로 오손구분 산정

(2) 오손내전압 목표치

○과전압 배수 : 1.2 (p.u)

○내전압 목표치 : $800 \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times 1.2 = 555 \text{ (kV)}$

다. 절연설계

(1) 일반지역 내오손 절연 소요애자갯수

상용주파과전압에 대한 소요애자갯수는 <표 5.2>및 <표 5.3>과 같다.

표 5.2 자기애자의 내오손 절연 소요애자갯수

구 격	지역(ESDD)	청정 I	청정 II	A	B	C	D
		(~0.01)	(~0.03)	(~0.063)	(~0.125)	(~0.25)	(~0.5)
300kN 보통	설계내전압 (kV/개)	19.5	15.0	12.9	11.2	9.6	8.5
	소요애자갯수 (개)	29	37	44	50	58	66
400kN 보통	설계내전압 (kV/개)	20.5	15.8	13.6	11.8	10.1	9.0
	소요애자갯수 (개)	28	36	41	48	55	62
530kN 보통	설계내전압 (kV/개)	24.0	18.5	15.9	13.8	11.8	10.5
	소요애자갯수 (개)	24	30	35	41	48	53
300kN 내무	설계내전압 (kV/개)	-	19.5	16.8	14.6	12.5	11.1
	소요애자갯수 (개)	-	29	34	39	45	50
400kN 내무	설계내전압 (kV/개)	24.6	19.8	17.0	14.7	12.6	11.2
	소요애자갯수 (개)	23	29	33	38	45	50

표 5.3 유리애자의 내오손 절연 소요애자갯수

구 분	청정 I	청정 II	A	B	C
	0.01 mg/cm ²	0.03 mg/cm ²	0.0625 mg/cm ²	0.125 mg/cm ²	0.25 mg/cm ²
$V_w =$ $V_{50}(1 - 0.68\sigma)$ $= 0.95 V_{50}$ (kV/m)	300S	97.4	86.8	80.2	73.2
	300F	119.7	110.1	103.6	97.8
	400S	101.7	90.3	82.7	76.0
	530S	"	"	"	"
	300S	5,698	6,394	6,920	7,582
	300F	4,637	5,041	5,357	5,681
소요애자런 길 이(mm)	400S	5,457	6,146	6,711	7,303
	530S	"	"	"	"
	300S	30	33	36	39
	300F	24	26	28	29
소요애자수량 (목표치:555kV)	400S	27	30	33	36
	530S	23	26	28	31

(2) 적설지역 내장애자련 소요애자갯수

적설지역의 내장애자련 소요애자갯수는 <표 5.4>와 같다.

적설지역의 소요애자 수량은 섬락경로가 눈을 통하여 이루어지므로 눈의 도전에 관계되고 애자의 오손특성과는 관련이 없다. 애자의 연결길이는 유리애자와 자기애자가 같으므로 소요애자수량도 유리애자와 자기애자가 같다.

표 5.4 적설지역 내장애자련 소요애자갯수

애 자 종 류		42 톤	54 톤
내 전 압 목 표 치		555kV	
적설 I	m당설계내전압	71 (kV/m)	
	설 계 내 전 압	14.5 (kV/개)	17.0 (kV/개)
	소요애자수량(개)	39	33
적설 II	m당설계내전압	78.5 (kV/m)	
	설 계 내 전 압	16.0 (kV/개)	18.8 (kV/개)
	소요애자수량(개)	35	30

(3) 상용주파 과전압에 대한 공기절연 소요거리^[29]

상용주파 과전압에 대한 공기절연거리(이상시 절연간격)는 전압 파고치로 환산하여 봉-평판 Gap의 개폐임펄스 섬락특성에 대한 Gap 계수 K를 구하여 적용하며, 그 결과는 <표 5.5>와 같다. 이 때 적용한 Gap 계수는 일본 CRIEPI의 Gap 계수이다.

$$V_{50} = K \cdot 1,080 \cdot \ln(0.46d + 1) \quad (5.1)$$

단 $K = 1.26$ (도체-탑체)

$= 1.44$ (도체-도체)

$$V_{50} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times 800 \times K_1 \times K_2 \quad (\text{kV}) \quad (\text{대지간})$$

$$V_{50} = \sqrt{2} \times 800 \times K_1 \times K_2 \quad (\text{kV}) \quad (\text{상간})$$

표 5.5 상용주파 과전압에 대한 공기절연 소요거리

구 분 항 목	대 지 간		상 간	
	1,000m이하	1,000m초과	1,000m이하	1,000m초과
K_1 (기상보정계수)	1.165	1.201	1.134	1.160
K_2 (내압계수)	1.099		1.099	
V_{50} (kV)	837	862	1409	1443
d (m)	1.85	1.93	3.21	3.32

(4) 상규 대지전압에 의한 분담전압 비교

<표 5.6>은 청정 I 지역 및 청정 II 지역에서 765kV 설계치와 일본 500kV 실적치(일본 1,000kV 설계치) 및 한전 345kV 송전선로의 상규대지전압에 대한 애자 한개당의 분담전압을 비교한 것으로서, 765kV 송전선로의 분담전압차원의 신뢰성은 일본 1,000kV와 비슷하며, 한전 345kV 송전선로보다는 높은 것으로 나타났다.

표 5.6 상규대지전압에 대한 애자 한개당 분담전압의 비교

오 손 지 역 구 분			청 정 I	청 정 II
등가염분부착밀도 (mg/cm ²)			0.01	0.03
765kV	상규대지전압 (kV)		462 (800 ÷ $\sqrt{3}$)	
	300kN	애자갯수(개)	29	37
	보 통	분담전압(kV/개)	16.0	12.5
일 본 500kV	상규대지전압 (kV)		318 (550 ÷ $\sqrt{3}$)	
	300kN	애자갯수(개)	20	-
	보 통	분담전압(kV/개)	15.8	-
* 한 전 345kV	상규대지전압 (kV)		210 (362 ÷ $\sqrt{3}$)	
	300kN	애자갯수(개)	-	16
	보 통	분담전압(kV/개)	-	13.1

* 345kV 내장 애자장치 기준

제 2 절 개폐과전압에 대한 절연설계

1. 개 요

전력계통의 개폐과전압에 대한 절연설계시 고려사항으로는 개폐과전압의 섬락특성에 영향을 주는 각종 parameter, 현수 및 내장애자장치 등의 대지간섬락특성, 선간섬락특성, 오손 및 적설애자련의 개폐과전압 섬락특성과 개폐사고율 등이 있다.

개폐과전압에 대한 섬락특성에 영향을 주는 요소로는 개폐과전압의 파형, 극성, 공극의 형상 및 기상상황 등이 있다. 대지간 섬락특성은 공극의 형상, 주위 물체배열 등의 영향을 받으므로 현수 및 내장애자련의 경우 각각 그 섬락특성은 다르게 나타난다. 선간섬락특성은 대지간섬락특성 관련요소 외에 상도체간의 전압차, 상도체전압 파고치간의 시간차 등의 영향을 받는다. 이들 Air Gap 및 애자련의 개폐과전압에 대한 섬락특성은 절연거리에 비례하지 않으며, 전압이 높아지면 포화되는 경향이 있다.

송전선로 절연설계를 위한 자료는 애자련에 대한 단독시험만으로는 부족하고 실제의 사용상태를 모의한 실규모 철탑모형에 애자장치를 취부하여 시험을 할 필요가 있다. 그러나 이에 대한 국내의 시험자료가 현재까지는 확보되지 않았으므로 본 검토에서는 외국의 시험결과를 이용하여 검토하였다. 현재 진행중인 "765kV 공기절연거리 실증 연구"에서는 현수애자장치에 대한 일부시험이 완료된 상태이며, 이 연구과제가 종료되면 국내 765kV 송전선 고유의 시험자료를 얻을수 있을 것이다. 또한 765kV 송전선로의 경과지중 일부구간은 오손 및 적설이 심한 지역을 통과하므로 오손 및 적설애자련의 개폐과전압에 대한 섬락특성에 대하여도 외국 자료를 이용하여 검토하였다.

2. 765kV 송전선로의 개폐과전압 절연설계

가. 개폐과전압 절연설계 순서

개폐과전압에 대한 송전선로의 절연설계는 Stress에 해당하는 내전압 목표치를 선정하고, 이에 대한 Strength로서 각 Air Gap의 Gap Factor를 사용하여 절연 이격거리를 및 소요애자수량을 산출하고 이를 확보하도록 하는 것이다. <그림 5.2>는 이의 흐름도를 나타낸 것이다.

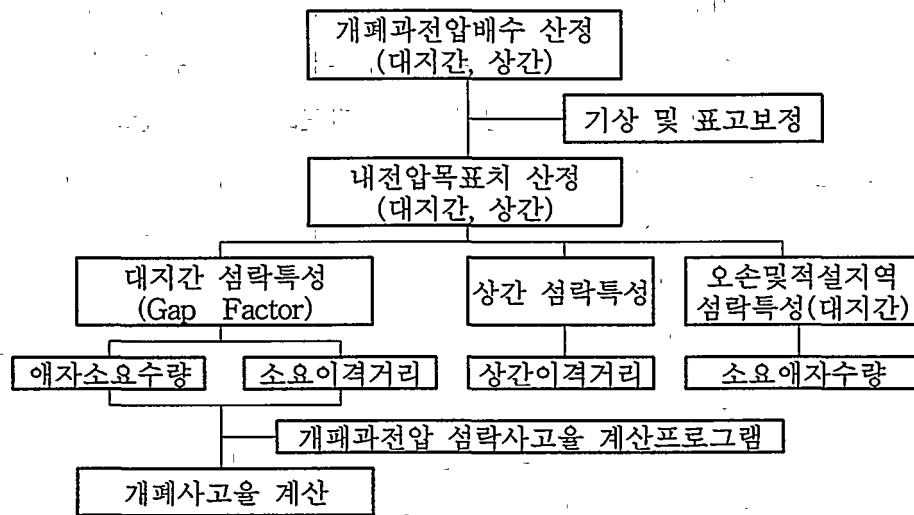


그림 5.2 개폐과전압에 대한 절연설계 흐름도

나. 절연설계 조건

표 5.7 절연설계 조건

구 분	설 계 조 건
계통 최고 전압	800 kV
개폐과전압 배수	대지간 : 1.9 p.u, 상 간 : 3.5 p.u
표 고	1,000m이하, 1,300m이하 기준
적용 Gap Factor	일본 CRIEPI 방법 적용
적용 Horn 능률	83% 이하
적설 지역 구분	상용주파 과전압 절연설계와 동일
오손 지역 구분	청정 I 지역 적용 (ESDD 0.01mg/cm ²)

다. 내전압 목표치

개폐과전압에 대한 소요 50% 섬락전압은 다음식과 같이 구한다.

$$V_{50} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times V_m \times n \times K_1 \times K_2 \quad (5.2)$$

여기서 V_m 은 계통최고전압, n 은 개폐과전압배수, K_1 은 기상보정계수, K_2 는 내

압계수이다. <표 5.8>은 계통최고전압이 800kV이고 개폐과전압배수가 1.9 p.u인 경우 V_{50} 산출결과를 나타낸 것이다.

라. 최소 공기절연 소요거리

개폐과전압에 대한 소요 Gap길이(최소절연간격)는 <표 부3.1>의 CRIEPI식에 각 경로별 Gap Factor를 적용하여 산출한다. <표 5.9>는 각각의 V_{50} 에 대하여 애자장치의 경로별 소요 Gap 길이를 산출한 결과이다. 내장애자장치의 Jumper는 도체를 사용한 조가식과 Pipe형에 대하여 검토하였다. 또한 아킹혼에서의 Gap Factor를 결정하는 D/d 의 값은 섬락이 혼간에서 일어나도록 하는 값을 상정하여 적용하였다.

표 5.8 765kV 송전선로의 개폐 50% 섬락전압 산출

표 고 구 분	1,000m 이하		1,300m 이하		비 고
	개폐씨지	교 류	개폐씨지	교 류	
T (°C)	13.5		11.6		(식 부3.6)
T' (°C)	16.8		15.8		(식 부3.7)
P(mmHg)	675.5		651.7		(식 부3.3)
δ_m	0.909		0.883		(식 부3.2)
V_t (mmHg)	11.6		10.3		포화수증기압
H_m	7.606		6.800		(식 부3.8)
k_{hm}	1.022	1.032	1.028	1.041	(식 부3.3)
k_{hm}/δ_m	1.125	1.136	1.165	1.179	-
k_h/δ	1.155	1.186	1.195	1.229	(식 부3.9)
d (m)	4.770	1.850 (3.210)	4.910	1.920 (3.320)	Horn Gap
ϕ	0.548	0.898 (0.735)	0.531	0.890 (0.722)	<그림 부3.6>
K_1	1.082	1.165 (1.134)	1.099	1.201 (1.160)	(식 부3.1)
K_2	1.176	1.099	1.176	1.099	(식 부3.10)
V_{50} 대지간	1,580	837	1,605	862	CRIEPI 식
V_{50} 상 간	2,910	1,409	2,956	1,443	

* 1) 과전압 배수 : 대지 1.9, 상간 3.5

* 2) () 내는 상간에 적용

표 5.9 개폐과전압에 대한 공기절연거리(애자장치)

구 분			Gap Factor	1,000m	1,300m	비 고
대지간 개폐 과전압		p.u	-	1.9	1.9	
		V ₅₀ (KV)	-	1,580	1,605	
현 수 애자장치	도체-상단암	-	1.19	5,260	5,410	
	도체-하단암	3 각암	1.30	4,530	4,650	
		4 각암	1.28	4,650	4,770	
	도체-탑 체	-	1.24	4,900	5,040	
	Arcing Horn Gap	-	1.26	4,770	4,900	D/d=1.2
내 장 애자장치 (도체 Jumper)	도체-상단암	-	1.31	4,470	4,590	
	도체-하단암	3 각암	1.34	4,310	4,420	
		4 각암	1.26	4,770	4,900	
	도체-탑 체	-	1.24	4,900	5,040	
	Arcing Horn Gap	애 자	1.43	3,880	3,980	D/d=1.3
		Jumper	1.41	4,100	4,200	D/d=1.15
내 장 애자장치 (Pipe Jumper)	도체-상단암	-	1.24	4,900	5,040	
	도체-하단암	3 각암	1.32	4,420	4,530	
		4 각암	1.24	4,900	5,040	
	도체-탑 체	-	1.22	5,040	5,180	
	Arcing Horn Gap	애 자	1.43	3,880	3,980	D/d=1.3
		Jumper	1.34	4,400	4,500	D/d=1.15
V 련 애자장치	도체-상단암	-	1.29 (1.19)	4,590 (5,260)	4,710 (5,410)	Arm폭: 2m 단, ()는 7m
	도체-탑 체	-	1.24	4,900	5,040	
	도체-하단암	-	1.28 (1.24)	4,650 (4,900)	4,770 (5,040)	
	Arcing Horn Gap	-	1.28	4,640	4,770	D/d=1.15
상 간 개폐 과전압	p.u		-	3.5	3.5	
	V ₅₀ (KV)		-	2,910	2,956	
	이격거리		-	8,420	8,640	CRIEPI식

<표 5.10>은 변전소 인입구 및 타공작물에 대한 소요 공기절연거리를 나타낸 것이다.

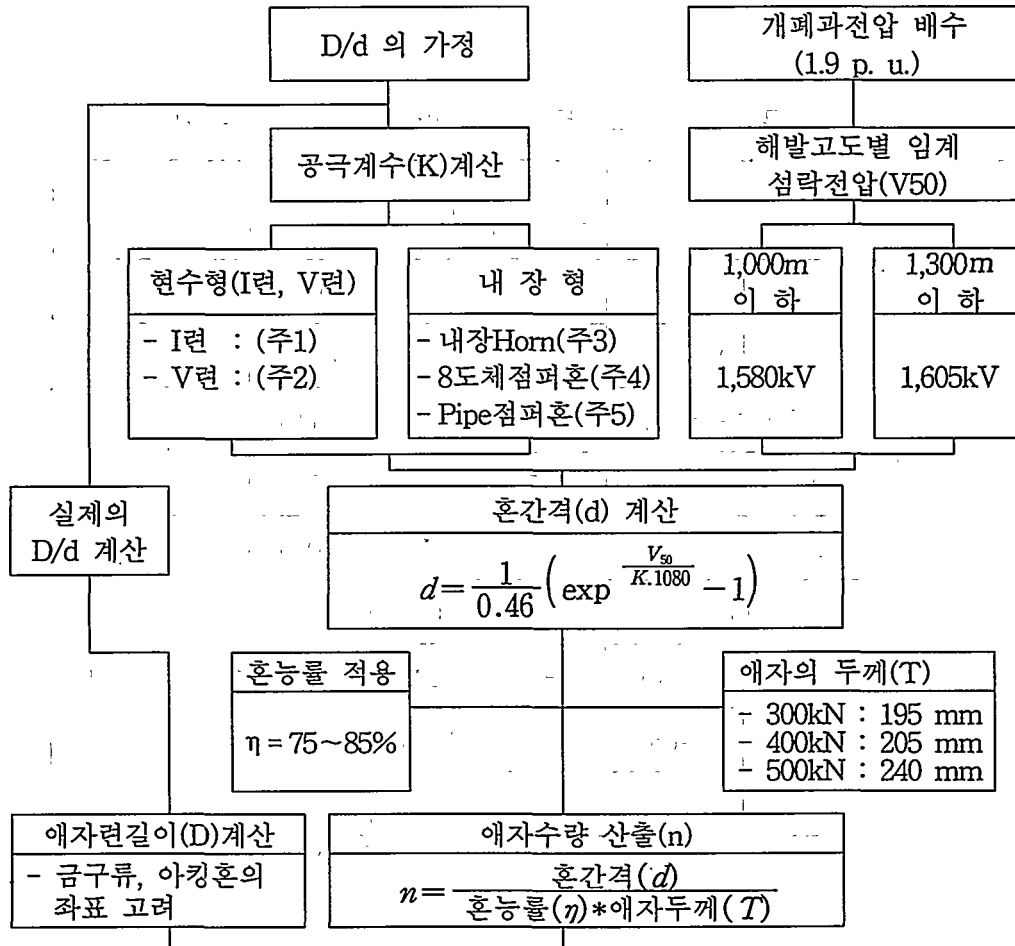
표 5.10 개폐과전압에 대한 공기절연거리(변전소 및 타공작물)

구 분			Gap Factor	1,000m	1,300m	비 고
대지간 개폐 과전압	p.u		-	1.9	1.9	
	$V_{50}(KV)$		-	1,580	1,605	
변전소인입구	인류애자장치A		1.23	4,970	5,110	CRIEPI식
	인류애자장치B		1.17	5,420	5,570	
타 공 작 물	도체-교차도체		-	3,900	4,000	<그림부3.21>
	도체-대 지		-	5,600	5,700	
	도 체 - 건조물	d=3m	-	4,300	4,400	
		d=6m	-	4,600	4,700	
		직 하	-	5,100	5,200	

마. 소요애자수량 및 혼간격의 선정

<그림 5.3>은 현수 및 내장 애자련의 혼간격(d)와 Horn끝 ~ 애자취부Arm간의 간격(D)의 관계로부터 소요애자수량 및 혼간격을 산출하는 방법의 흐름도이다.

섬락경로는 혼간 또는 Horn ~ Arm간이 될 수 있으며, 부록 3의 Horn Gap 계수와 D/d의 관계곡선에서, 어느 D/d에 대응하는 K값 이상을 유지하면 개폐에 의한 섬락은 혼간에서 발생하게 된다. 또한 섬락전압은 K와 d의 함수이므로 어느 V_{50} 을 만족하는 K와 d의 값, 즉 D/d의 값은 다수가 존재하게 된다. 이중 D



- 주) 1. I런은 도체측 혼끝과 상단압간을 고려, $K = 1.68 \exp \left(-\frac{0.34}{D/d} \right)$
 2. V런은 도체측 혼끝과 상단압간을 고려, K계수는 부록3 2절 라항 참조
 3. 내장흔에 대하여는, $K = 2.17 \exp \left(-\frac{0.54}{D/d} \right)$
 4. 8도체 점퍼흔에 대하여는, $K = 2.25 \exp \left(-\frac{0.54}{D/d} \right)$
 5. 파이프 점퍼흔에 대하여는, $K = 2.12 \exp \left(-\frac{0.54}{D/d} \right)$

그림 5.3 D/d에 의한 혼간격 및 애자수량 산출방법 흐름도

의 값은 애자수량과 금구류의 길이로 결정되는 것이므로, 어느 일정한 금구류의 길이에 대하여 목표 V_{50} 을 만족하는 애자수량과 혼간격은 설계시 적용하고자 하는 혼능률에 따라 다양하게 조합할 수 있게 된다. 그러므로 본 검토에서는 금구류의 길이를 일정하게 놓고, D/d 값을 가정하여 구한 공극계수(K)를 이용하여 해발고도별 목표 V_{50} 을 만족하는 혼간격 및 애자수량을 산출하였다. 검토에 사용한 송전선로의 애자장치도와 상세한 산출내역은 부록 5에 명기하였다.

<표 5.11>은 검토된 혼능률 중에서 본 검토에 적용하고자 하는 혼능률 80 ~ 83%를 만족하는 개폐소요 혼간격중 큰 값과 애자수량을 정리한 것이다.

표 5.11 혼간격과 소요애자수량

구 분			애자규격	300kN	400kN		530kN
				현수	현수	내장	내장
1,000m	1,580 (kV)	혼 간 격 (mm)		4,800	4,800	4,200	4,100
		애자갯수		30	29	25	21
1,300m	1,605 (kV)	혼 간 격 (mm)		5,000	4,300	4,300	4,300
		애자갯수		31	29	26	22

V형 Jumper지지장치는, 문헌[28][33] 및 적용사례를 참조하여 보면, $D/d=1.10$ 이상, 혼능률 63% ~ 80% 정도를 적용하고 있다. 그러므로 본 검토서는 애자금구류의 길이는 문헌[33]를 참조하여, 일정한 값을 갖는 것으로 하여 $D/d=1.1 \sim 1.3$ 의 범위에 대하여 적절한 혼간격, 애자수량 및 혼능률에 관하여 검토하였다. <그림 5.4>는 V형 Jumper지지장치의 형상을 나타낸 것이며, 이때 개각(애자련-애자련 사이의 각)의 크기는 과전압에 영향을 미치지 않으므로^[28] 외국 적용사례를 참조하여 90°로 가정하였다.

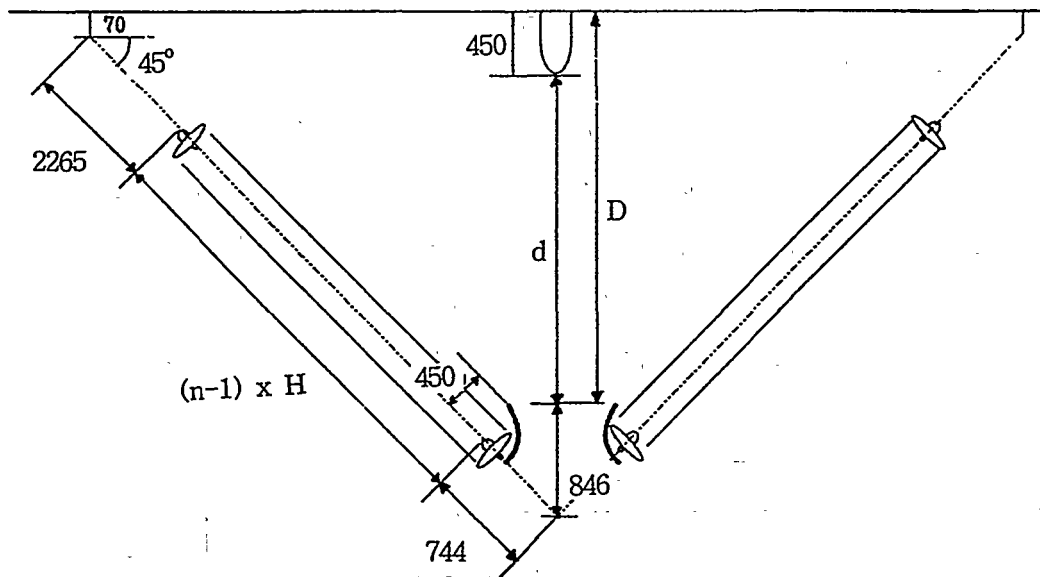


그림 5.4 V형 잠바지지장치의 구조

혼능률에 관하여는 일본 500kV급 적용사례(혼능률 70%~75%)를 참조하여 요약한 것이 <표 5.12>이다.

표 5.12 V형 잠바지지장치의 혼간격 및 소요애자수량

구분 애자 규격	300kN		210kN	
	혼간격(mm)	애자수(혼능률)	혼간격(mm)	애자수(혼능률)
1,000m이하	4,400	31 (72.79%)	4,400	36 (71.90%)
1,300m이하	4,600	33 (71.48%)	4,600	38 (71.21%)

이 때, 적용한 애자런 금구류와 애자수량과의 관계는 다음과 같다.

$$D = (2,265 + n \times H + 544) \cos(45^\circ) - 846 + 70$$

$$n = \frac{\frac{D + 776}{\cos(45^\circ)} - 2,809}{H}$$

내장애자장치에 잠바내혼을 적용하는 경우는, 목표 V_{50} 의 크기 및 D/d 의 값에 의하여 혼간격이 결정되며, 개폐소요 애자 수량은 섬락 경로가 잠바내혼으로 되므로, 잠바내혼 간격 d 에 대하여 혼능을 83% 이하를 만족하는 애자수량이 된다. <표 5.13>은 도체 잠바내혼 및 파이프 잠바내혼에 대하여 D/d 및 혼능률별로 산출한 소요애자 수량을 적절한 $D/d=1.15$ 및 혼능률 80%를 기준으로 요약한 것이다

표 5.13 잠바내혼 적용 내장애자장치의 혼간격 및 소요애자수량

구 분 애자종류		파이프 잠바혼		도체 잠바혼	
		혼간격(mm)	애자갯수	혼간격(mm)	애자갯수
400kN	1,000m	4,400	27	4,000	25
	1,300m	4,500	28	4,100	26
530kN	1,000m	4,400	23	4,000	21
	1,300m	4,500	24	4,100	22

<표 5.14>는 적설지역 내장애자런의 개폐과전압에 대한 절연 소요애자수량을 나타낸 것이다.

표 5.14 적설지역 내장애자련의 개폐과전압 소요애자갯수

과전압 배수		1.9 p.u					
지 역 별		1241kV $\left(800\text{kV} \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times 1.9\right)$					
내전압 목표치							
애 자 장 치		2련 내장		3련 내장		4련 내장	
애 자 종 류		400kN	530kN	400kN	530kN	400kN	530kN
적설 I (100 $\mu\text{U}/\text{cm}$)	m 당 설계내전압	154 (kV/m)		136 (kV/m)		119 (kV/m)	
	설계내전압 (kV/개)	31.57	36.96	28.29	33.12	24.39	28.56
	애 자 수 량 (개/련)	40	34	44	38	51	44
적설 II (50 $\mu\text{U}/\text{cm}$)	m 당 설계내전압	176 (kV/m)		156 (kV/m)		136 (kV/m)	
	설계내전압 (kV/개)	36.49	42.72	32.39	37.92	28.29	33.12
	애자수량 (개/련)	35	30	39	33	44	38
<비고> * 적설시 섬락전압의 편차 $\sigma=10\%$ 이고 적설 I 지역에서는 3σ를 고려하였으며, 적설 II 지역에서는 적설과 개폐과전압의 동시발생확률이 적으므로 2σ를 고려하였음. * 일본 UHV 실증위원회 보고 4련내장장치의 개폐임펄스 섬락특성으로부터 2련 내장장치의 특성을 유추하였으며, 그 중간값을 3련 내장장치 특성으로 적용하였음. * Jumper Horn 및 Corona Shield Ring을 적용할 경우는 이를 감안하여 애자를 1개씩 증결함.							

제 3 절 뇌과전압에 대한 절연

1. 개 요

뇌격에 의한 송전선의 섬락사고는 매우 복잡한 전자기현상으로서 그 현상을 명확히 규명하여 사고를 줄이기는 어려우므로, 뇌관측 Data를 이용하여 사고확

를을 계산한 후 사고실적과 비교, 보정함으로써 사고율이 목표사고율 범위 내에 오도록 내외대책을 강구하고 있다.

송전선의 뇌에 의한 사고는 가공지선등의 차폐실패로 인하여 전력선도체에 낙뢰가 직접 도달하여 아킹혼 또는 애자련을 통하여 섬락이 발생하는 직격뢰사고와 철탁 또는 가공지선 경간내에 낙뢰가 도달하여 철탁에서 아킹혼 또는 애자련등을 통하여 섬락되는 역섬락이 있다. 이들 뇌에 의한 사고는 뇌격특성과 같은 인위적으로 제어하기 불가능한 사항과 차폐각, 탐각접지저항등의 인위적 수단을 사용하여 제어 가능한 사항이 있다.

뇌과전압에 대한 절연설계는 뇌에 의한 기존선로의 사고율을 감안하여 목표사고율을 선정하고, 가공지선 Arm길이, 아킹혼간격 및 철탁접지저항의 변화시 예측사고율 변화를 검토하여 목표사고율을 만족하면서 합리적인 절연설계가 되도록 하는 것이다.

본 연구에서는 외국의 문헌을 참고하여 뇌의 특성에 관하여 검토한 후, 일본 전력중앙연구소의 뇌사고율 예측계산식을 기본으로 하여 자체적으로 개발한 "KLFOR"(1995) Program을 이용하여 뇌차폐실패율(SFFOR)과 역섬락사고율(BFOR)을 계산하였다.

뇌사고율의 예측프로그램은 IEEE의 "FLASH" 와 일본의 전력중앙연구소에서 개발한 프로그램이 있는데 수평배열 송전선을 기본으로 하여 개발된 "FLASH" 보다는 수직배열 선로를 기본으로 개발한 CRIEPI방식이 우리 송전선로에 대한 예측계산의 정밀도가 높을 것으로 판단되며, CRIEPI측에서 프로그램을 공개하지 않고 있어 자체적으로 프로그램을 개발하였다. KEPRI프로그램은 기존의 개념보다 더욱 정밀한 것이라고 생각하고 있는 예측계산 식으로서 일본에서도 아직 프로그램화는 되지 않았고 현재는 간이식을 사용하고 있다. 여기서 송전선에 역섬락을 일으키는 뇌격전류 크기의 계산은 EMTP를 이용하여 계산하였다.

자체 프로그램에 의한 계산결과는, 일본의 1,000kV 및 500kV의 모델 철탁에

대하여 일본의 전력중앙연구소에 의한 계산 결과와 비교하여 유사한 경향성과 계산결과를 얻었으며 345kV 송전선로의 뇌사고율을 예측 계산하여 그 실적치와 비교하였다. 이러한 차폐실패사고율 및 역섬락사고율로부터 가장 합리적인 가공지선 암길이, 혼간격 및 접지저항을 선정하였다.

2. 765kV 송전선로의 뇌과전압에 대한 절연설계

가. 뇌과전압 절연설계 방법

뇌과전압에 대한 절연설계는 목표 사고율을 만족하도록 선로의 제반 요소를 선정하는 것으로서 사고율의 예측계산 순서는 <그림 5.5>와 같다.

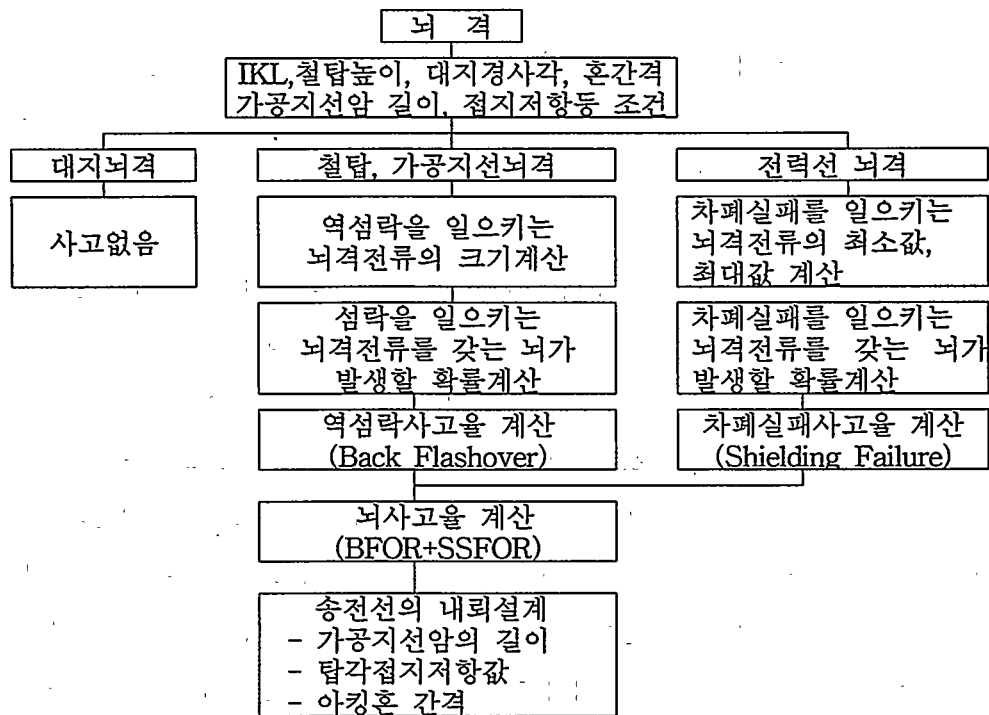


그림 5.5 뇌사고율 예측계산 순서

나. 뇌과전압 절연설계 조건의 선정

뇌과전압에 대한 절연설계시의 기본 조건은 <표 5.15>와 같다.

표 5.15 뇌과전압에 대한 절연설계 기본조건

항 목	조 건
연간 뇌우일수 (IKL)	20
첼 탑 형 상	<그림 부4.22> 참조
첼 탑 높 이	85m
전 력 선	ACSR 480 ^o × 6B (Cardinal)
가 공 지 선	OPGW 200 ^o
경 간 및 표 고	경간 450 m , 표고 800 m

다. 뇌과전압 절연설계

(1) 목표 사고율의 선정

뇌사고율 목표치는 한전 345kV와 일본 500kV는 1.0(회/100km/year) 이하, 일본 1,000kV는 0.33~0.39(회/100km/year) 정도로 하고 있다.^[16] 이를 기준으로 765kV 송전선로에서는 선로의 중요성을 감안하고 외국 전력회사의 사고율 목표치를 참작하여 목표 사고율을 일본 1,000kV와 동등한 수준으로 유지하고자 하며, 345kV 선로의 예측사고율에 대한 실제 사고실적을 감안하면 실제 사고율은 예측계산치보다 더 작은 값으로 될 것이다.

(2) 가공지선 Arm길이의 선정

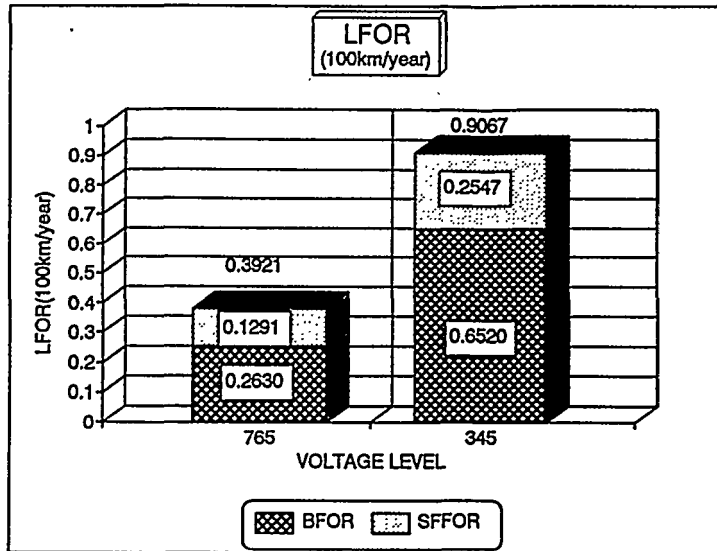
뇌격에 의한 사고중 차폐실패사고는 첼탑높이뿐 아니라 가공지선의 차폐범위

에 의해서도 달라진다. 본 검토에서는 가공지선의 차폐범위를 전력선 상단암의 전력선 위치에 대하여 가공지선의 창출길 이로써 나타내었으며, 창출길이를 1. m에서 4m까지 0.5m 간격으로 변화시켜 차폐실패사고율을 검토함으로써 적절한 가공지선 Arm길이를 선정하는 방법을 사용하였다.

<그림 부4.23>에서 일본의 1,000kV 송전선에 대한 차폐실패율(IKL=30, 창출길이 3.5m)과 동등한 수준의 차폐실패율을 확보하기 위하여는 상단암에 대한 창출길이를 2.0m(IKL=20, 최장암인 하단전력선암에 대한 창출길이 1.0m)로 하였다. 이때의 차폐실패사고율은 약 1.0[건/100km·년]이 된다.

(3) 아킹혼 간격 및 철탑 접지저항의 선정

아킹혼 간격 및 철탑 접지저항은 뇌격에 의한 역섬락사고에 결정적 영향을 주는 요소로서, 아킹혼 간격을 늘리거나 접지저항을 낮은 값으로 제한함으로써 뇌에 의한 사고를 크게 감소시킬 수 있다. 그러나 아킹혼 간격을 늘리면 소요 애자수량이 증가되어 비경제적이며, 개폐씨의 섬락경로를 아킹혼으로 유도하기 위한 아킹혼의 간격에는 한계가 있다. 또한 접지저항은 대지의 고유성질에 의해 결정되는 값으로서 낮은 값으로 제한하는 데에는 한계가 있다. 따라서 목표 사고율을 만족하면서 적절한 아킹혼 간격 및 철탑 접지저항의 선정이 필요하다. <그림 5.6>은 탑각접지저항을 15[Ω], 가공지선의 창출길이를 최장암 대비 1.0m로 한 경우의 765kV 송전선로의 뇌사고율과 345kV 송전선에 대한 뇌사고율을 예측계산하여 비교한 것이다. 평균 대지경사각 10도, 탑각접지저항의 비율 15[Ω] : 10[Ω]을 8 : 2로 가정한 경우 뇌사고율은 약 3.9[건/100km.년]이 되나, 345kV 송전선에 대한 뇌사고실적에 의한 보정비를 감안하면 실제의 사고율은 0.32[건/100km·년] 정도로 예측된다.



765kV송전선의 뇌사고율표

사고율	현수	내장	평균
BFOR	0.2350	0.2910	0.2630
SFFOR	0.1161	0.1423	0.1291
LFOR	0.3511	0.4330	0.3921

그림 5.6 345kV 및 765kV 송전선의 뇌사고율

(4) 뇌과전압 절연설계 결과

이상의 결과를 종합하여 765kV 송전선의 뇌과전압에 대한 절연설계 결과 얻어진 가공지선 Arm 길이, 철탑 접지저항 및 아킹혼 간격을 나타내면 <표 5.16>과 같다.

표에서 뇌과전압에 대한 공기절연거리(표준절연간격)는 1,000kV에 대한 일본 CRIEPI의 시험 결과 1.05Z(m)의 이격거리면 충분한 것으로 나타났으나, 765kV에 대한 시험실적은 없으므로 신뢰성을 감안하여 현재까지 사용하던 $1.115 \cdot Z + 21$ (mm)의 식을 사용하여 산출하였다.

표 5.16 765kV 송전선로의 뇌과전압 절연설계 결과

항 목		내 리 설 계	
가공지선 Arm 길이		최외측 전력선 암보다 1m 길게	
철 탐 접 지 저 항		15 Ω	
섬 락 경 로		현 수 장 치	내 장 장 치
		애 자 려 n Horn	Jumper Horn
Horn 간 격		4,800 mm	4,600 mm
표 준 절연간격	적용방법	$1.115 \cdot Z + 21$ [Z : Horn 간격(mm)]	
	이격거리	현 수 철 탐	내 장 철 탐
		5,380 mm	5,150 mm

제 4 절 765kV 송전선로의 절연설계

1. 절연설계 일반사항

765kV 송전선로의 절연설계에서는 계통 설계전압을 800kV로 하여, 상용주파 과전압은 대지간전압 실효치의 1.2배, 개폐과전압은 대지간전압 파고치의 1.9배를 적용하였다. 선로경과지의 해발고도는 1,000m이하와 1,000m초과 1,300m이하의 두가지 경우로 구분하여 검토하였다.

소요애자수량 산출을 위한 오손지역 구분은 경제적인 절연설계를 위하여, 청정지역을 세분하여 청정 I 지역과 청정 II 지역으로 구분하여 검토하였다. 적설지역의 구분은, 이에 관한 국내기준이 없으므로 외국의 적설지역구분을 참조하여 적용하였다.

공기절연간격(Clearance)의 산출은 상용주파과전압배수, 개폐과전압배수 및 해발고도 각각의 조합에 대하여, 일본 CRIEPI에서 제시한 식을 적용하여 산출하였다. 이때 각 절연간격(표준절연간격, 최소절연간격, 이상시절연간격)에 대응하는 횡진각은 현재 345kV 선로에 적용하고 있는 횡진각중, 현수애자장치에서 20°(내장 15°)이상의 횡진각과 개폐과전압 최대치 발생이 중첩되기 어렵다는 점과 일본 1,000kV 송전선로 적용개념을 참조하여, 20°(내장 15°)부터는 최소절연간격을 하단암 및 탐체와의 Clearance에 직접 적용하는 것으로 하였다.

유리애자를 적용할 경우 소요애자수량은 개폐과전압 및 뇌과전압에 대하여는 아킹흔 간격과 Gap factor 등이 자기애자 적용시와 같다는 전제하에 자기애자 소요수량과 같이 적용할 수 있으며, 상용주파과전압에 대하여는 유리애자의 내오손특성에 따라 결정되므로 별도로 검토 하였다.

2. 혼간격 및 소요 애자수량 산출

절연설계 소요 혼간격은 개폐 및 과전압에 대하여 필요한 혼간격과 애자런 보호를 위한 적절한 혼능률 등을 감안하여 결정하며, 오손지역 구분과는 상관없이 동일한 혼간격이 필요하다.

절연설계 소요애자수량은 각종 과전압에 대하여 고도별 장주별로 소요애자수량을 산출하고 그중에서 가장 많은 애자수량을 적용한다. 설계결과 청정 I 지역 이외의 오손지역에서는 상용주파과전압에 대한 오손설계에서 애자수량이 결정되

며, 적설지역은 적설애자련의 섬락특성에서 애자수량이 결정된다. 따라서 청정 I 지역, 청정 II 지역 및 오손지역, 적설지역으로 구분하여 소요애자수량을 산출하는 것이 편리하다. 특히 청정 I 지역에서는 표고 및 애자장치의 종류에 따라서도 소요애자수량이 달라지므로 적용에 세심한 주의가 요구된다.

가. 혼간격 및 청정 I 지역 소요 애자수량

청정 I 지역 소요애자수량은 상용주파 과전압, 개폐과전압 및 뇌과전압에 대한 절연에 소요되는 애자수량을 비교하여 제일 많은 것으로 한다. 이 중 개폐과전압에 대한 소요 수량은 혼간격과 밀접한 관계가 있으며 혼능률과 적절한 D/d 값 등을 적용하여 장주별 및 애자 규격별로 추출한 <표 5.12 및 5.13>과 뇌과전압에 대한 적정 사고율을 유지시키는 소요 혼간격 및 애자 수량을 비교하여, 가급적 소요애자 수량의 증가를 억제하는 동시에 해발고도에 따른 소요애자 수량 및 혼간격의 적용을 단순화 하는 방향으로 애자수량 및 혼간격을 결정하였다.

내장 애자장치의 경우는 혼의 취부위치(애자련, 잠바내)에 따라, 특히 잠바내 혼의 경우는 잠바의 재질(pipe, 도체)에 따라 각각 소요 애자수량 및 혼간격에 차이가 나타나므로 이들 모두를 비교 대상으로 하였다. 다음의 <표 5.17>은 청정 I 지역에 대한 현수 및 내장 장주의 혼간격 및 애자수량을 산출한 것이다.

표 5.17 청정 I 지역 소요애자수량 산출표(현수, 내장)

애 자 종 류			300kN	400kN		530kN
			현 수	현 수	내 장	내 장
상 용 주 파 과전압	오 손 구 분		ESDD 0.01 mg/cm ² 이하 (청정 I 지역)			
	내전압목표치		555 kV $\left(800\text{kV} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times 1.2\right)$			
	자기 애자	설계내전압 (kV/개)	19.5	20.5	20.5	24.0
		소요애자 수량 (개)	29	28	28	24
	유리 애자	설계내전압 (kV/m)	97.4	101.7	101.7	101.7
		소요애자 수량 (개)	30	27	27	23
개 폐 과전압	내전압목표치		1,241 kV $\left(800\text{kV} \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times 1.9\right)$			
	소요 V ₅₀ (kV)		1,000m이하: 1,580, 1,300m이하: 1,605			
	소요Horn 간격(mm)	1,000m	4,800	4,800	4,200 (4,400)[4,000]	4,100 (4,400)[4,000]
		1,300m	5,000	4,900	4,300 (4,500)[4,100]	4,300 (4,500)[4,100]
	소요애자 수량 (개)	1,000m	30	29	25 (27) [25]	21 (23) [21]
		1,300m	31	29	26 (28) [26]	22 (23) [21]
뇌 과전압	섬 락 경 로		Horn 간			
	Horn간격 (mm)	1,000m	현수 : 4,800 내장 : 4,600			
		1,300m				
	Horn 능 륜		83 % 이 하			
	소요애자 수량(개)	1,000m	30	29	28	24
		1,300m				
최 종 설 계	적용 Horn 간격 (mm)	1,000m	4,800	4,800	4,600	4,600
		1,300m	5,000	5,000	4,600	4,600
	애자갯수 (개)	1,000m	30	29	28	24
		1,300m	31	29	28	24

* 내장애자런 적용 경우
* ()는 내장 애자장치의 파이프 잠바내혼 사용 경우
* []는 내장 애자장치의 도체 잠바내혼 사용 경우

나. 청정Ⅱ지역 및 오손지역 소요 애자수량

<표 5.18>은 청정Ⅱ지역 및 오손지역에 대한 소요애자수량을 나타낸 것이다. 청정Ⅱ지역 및 오손지역에서의 소요애자수량은 상용주파과전압에 대한 오손설계에 의해 결정된다.

표 5.18 청정Ⅱ지역 및 오손지역 소요애자수량(현수, 내장)

ESDD(지역)			청정Ⅱ (~0.03)	A (~0.063)	B (~0.125)	C (~0.25)	D (~0.5)
자 기 애 자	300kN 보 통	설계내전압(kV/개)	15.0	12.9	11.2	9.6	8.5
		소요애자갯수(개)	37	44	50	58	66
	400kN 보 통	설계내전압(kV/개)	15.8	13.6	11.8	10.1	9.0
		소요애자갯수	36	41	48	55	62
	530kN 보 통	설계내전압(kV/개)	18.5	15.9	13.8	11.8	10.5
		소요애자갯수	30	35	41	48	53
	300kN 내 무	설계내전압(kV/개)	19.5	16.8	14.6	12.5	11.1
		소요애자갯수	29	34	39	45	50
	400kN 내 무	설계내전압(kV/개)	19.8	17.0	14.7	12.6	11.2
		소요애자갯수	29	33	38	45	50
유 리 애 자	300kN 보 통	설계내전압(kV/m)	86.8	80.2	73.2	66.5	-
		소요애자갯수	33	36	39	43	-
	400kN 보 통	설계내전압(kV/m)	90.3	82.7	76.0	68.9	-
		소요애자갯수	30	33	36	40	-
	530kN 보 통	설계내전압(kV/m)	90.3	82.7	76.0	68.9	-
		소요애자갯수	26	28	31	34	-
	300kN 내 무	설계내전압(kV/m)	110.1	103.6	97.8	91.7	-
		소요애자갯수	26*	28*	29*	31	-

주) *는 개폐과전압 설계에 의하여 30개(1,000m이하) 소요됨

다. V련 혼간격 및 소요애자 수량

일반지역의 V련 애자장치 및 잠바 지지장치에 대한 소요애자수량은 V조 내 혼의 능력을 개폐 및 뇌에 관하여 모두 75%정도로 유지할 경우, 다음의 <표 5.19>와 같다.

표 5.19 일반지역 소요 애자수량(V련 잠바지지장치)

구 분			ESDD(지역)	청정 I (~0.01)	청정 II (~0.03)	A (~0.063)	B (~0.125)	C (~0.25)	D (~0.5)
상 주 과 전 압 연	내전압목표치			555 kV					
	자 기	설계내 전 압 (kV/개)	300kN	19.5	15.0	12.9 (16.8)	11.2 (14.6)	9.6 (12.5)	8.5 (11.1)
		소 요 수 량	300kN	29	37	44(34)	50 (39)	58 (45)	66 (50)
	유 리	설계내 전 압 (kV/m)	300kN	97.4	86.8	80.2 (103.6)	73.2 (97.8)	66.5 (91.7)	-
		소 요 수 량	300kN	30	33	36 (28)	39 (29)	43 (31)	-
	개 폐 과 전 압 연	해발고도 (m)		1,000이하				1,300 이하	
소요 V ₅₀ (kV)		1,580				1,605			
소요혼간격 (mm)		300kN	4,400				4,600		
소요수량		300kN	31				33		
뇌 과 전 압 연	섬락경로		V조내 impulse 혼간						
	혼 간 격		4,600mm (내장장치에 준함)						
	혼 능 력		75%						
	소요수량	300kN	33 (corona shield ring 감안 1개 증결)						
적용 혼간격			4,600mm						
적 용 수 량	1,000 m	300kN	33	상 용 주 과 소 요 수 량					
	1,300 m	300kN	33						

* ()는 내무애자 적용할 경우임.

라. 적설지역 소요애자수량

적설지역에 대한 구분은 눈녹인 물의 도전율에 따라 도전율이 100($\mu\text{S}/\text{cm}$)이면, 적설 I 지역, 50($\mu\text{S}/\text{cm}$)이면 적설 II 지역으로 하였다. <표 5.20>은 적설지역 소요 애자수량을 요약한 것으로, 잠바내흔을 사용하고 Corona shield ring을 적용할 경우는 이를 감안하여 내전압설계에서 산출한 수량에 1개를 추가하도록 한다.

표 5.20 적설지역 내장애자련 소요애자수량 검토표

애 자 종 류			400 kN	530 kN
상용주파 과 전 압	내전압목표치 (kV)		$555 \left(\frac{800}{\sqrt{3}} \times 1.2 \right)$	
	적설 I	m당 내전압(kV/m)	71.0	
		설계내전압(kV/개)	14.5	17.0
		소요애자수량(개)	39	33
	적설 II	m당 내전압(kV/m)	78.5	
		설계내전압(kV/개)	16.0	18.8
		소요애자수량(개)	35	30
개 폐 과 전 압	내전압목표치(kV)		$1,241 \left(800 \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times 1.9 \right)$	
	적설 I	소요50% FOV(kV)	1,773 (1,241 / 0.7)	
		m당 내전압(kV/m)	154(2련), 136[3련], 119{4련}	
		설계내전압(kV/개)	31.5[28.3]{24.4}	36.9[33.1]{28.6}
		소요애자수량(개)	40[44]{51}	34[38]{44}
	적설 II	소요50% FOV(kV)	1,552 (1,241 / 0.8)	
		m당내전압(kV/m)	176[156]{136}	
		설계내전압(kV/개)	36.5[32.4]{28.3}	42.7[37.9]{33.1}
		소요애자수량(개)	35[39]{44}	30[33]{38}
	적 용 애 자 수 량	적설 I (100 $\mu\text{S}/\text{cm}$)	40[44]{51}	34[38]{44}
		적설 II (50 $\mu\text{S}/\text{cm}$)	35[39]{44}	30[33]{38}

* 2련 적용 기준이며, []는 3련, { }는 4련 경우임.

3. 횡진각 및 소요 공지절연거리 산출

가. 횡진각 산출

현수애자런 및 내장 Jumper의 횡진각 산출에 적용한 식은 다음과 같다.^[38]

(1) 현수애자런 횡진각 산출식

$$\theta = \tan^{-1} \frac{W_w}{\frac{W_i}{2S} + W_c \cdot n}$$

$$W_w = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot \rho \cdot V^2 \cdot d \cdot n \text{ (kg/m)}$$

단, W_w : 전선 단위길이당 풍압 (kg/m)

W_i : 애자런의 중량 (kg)

W_c : 전선의 단위길이당 중량 (kg/m)

S : 경 간 (m) n : 도체수

C_x : 저항계수(=1) ρ : 0.125

V : 평균풍속 (m/s) d : 전선 외경 (m)

(2) 내장 Jumper의 횡진각 산출식

$$\varphi = \alpha (1 - C) \quad : \text{Jumper의 횡진각}$$

$$\alpha = \tan^{-1} (W_w / W_c) \quad : \text{풍압각}$$

$$C = \frac{2 \cdot (\cosh B - 1)}{B \cdot \left(\sinh B + \frac{B \cosh B - \sinh B}{A_2 + A_3} \right)} \quad : \text{저감계수}$$

$$\begin{aligned}
\text{단, } A &= 2d / L_0, \\
A_1 &= W_c \cdot L_0^3 / (EI \cdot F) \\
A_2 &= k \cdot L_0 / \{EI \sin^2(\beta + \gamma)\}, \\
A_3 &= \sin \gamma / \{\sin(\beta + \gamma) \cdot \cos \beta\} \\
B &= \sqrt{A_1 \sqrt{1 + P_0^2}}, \quad P_0 = W_w / W_c \\
k &= \frac{2ab}{\ell} + 1.115 \ell + \frac{875}{T}
\end{aligned}$$

여기서 d : 점퍼선의 처진 길이(m)

L_0 : 점퍼 전길이의 $\frac{1}{2}$ (m)

EI : 전선의 구부림 모멘트(kg·m/rad)

F : 전선의 단면적(m²)

k : 애자련의 구부림 모멘트(kg·m/rad)

β : 점퍼의 카테나리각(72°)

γ : 점퍼의 경간에 대한 카테나리각(8°)

ℓ : 애자련의 길이(m)

a, b : 애자련의 상단 및 하단간격(m),

T : 전선의 수평장력(kg)

(3) 현수애자련 및 내장 Jumper의 횡진각

50년 재현기간의 최대풍속이 40m/s 이고, 10분간 평균풍속이 3.82m/s인 지역에서 풍속의 분포는 99%이상이 15~20m/s 이내에 있게 되며 또한, 이 정도의 강풍과 개폐씨의 최대치가 중첩될 확률은 매우 희박하다. 이를 기초로 일본 1,000kV T/L의 경우 최소절연간격 대응 횡진각을 현수 20°, 내장 15°로 하고 있으며, 이상시 절연간격은 각각 60°, 40°로 적용하고 있다. 한편, 현재 우리회사

“잠정설계기준-1211”는 현수철탑의 최소철연간격 유지범위는 최대풍속 20m/s로 하여 40°, 이상시 철연간격은 30m/s로 하여 70°를 유지하고 있으며, 내강 철탑에 관하여는 언급이 없다. 또한 “송전철탑 표준화 용역에 관한 최종보고서(1990.8)에는 345kV 4도체 현수철탑은 40°에서 최소철연간격을 유지하도록 하고 있으며, 이상시 철연간격에 관한 사항은 없다. 765kV 현수 및 내강점퍼의 횡진은 <그림 5.7>에서 보듯이, 15~20ms의 풍속시, 각각 20°, 15°정도이고, 30ms풍속시 약 45°, 30°, 35ms시, 약 50°, 40°, 40ms시 약 60°, 40°정도이다. 그러므로, 본 검토는 횡진에 대한 여유 및 상기 345kV 및 일본의 사례등을 참조하여, 최소철연간격 및 이상시 철연간격 대응 횡진각을 현수는 20°, 60°, 내강은 15°, 40°로 적용하였으며, 이외에 수평각에 의한 상시횡진을 감안하였다.

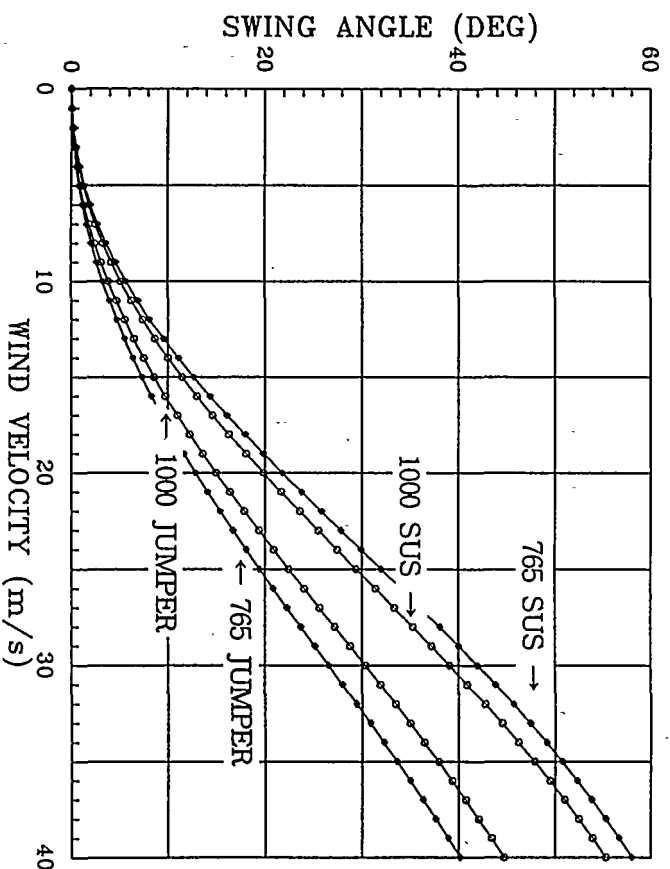


그림 5.7 현수애저련 및 내강애저련 점퍼의 횡진

나. 소요 공기절연거리 산출

소요 공기절연거리(Clearance, 절연간격)에는 표준절연간격, 최소 절연간격, 이상시 절연간격 및 상간 절연간격이 있으며, 유리에자를 적용할 경우에도 자기에 자의 경우와 같은 Gap factor 및 아킹혼간격을 갖는 것으로 하였으므로 같은 공기절연거리를 갖는 것으로 적용할 수 있다.

(1) 표준절연간격

뇌과전압에 견디는 표준절연간격의 산출식은 $1.115Z + 21$ (mm)로 아킹혼의 간격에 비례하므로, 현수장치의 경우 최소혼간격에 대응하는 절연간격으로부터 애자련의 길이 증가에 따라 증가하게 된다. 내장장치의 경우는 잠바의 제일 깊은 곳과 하단암과의 간격이다. 현수장치와 V련은 횡진이 없을 때의 철탑측 소도체 위치에서, 내장장치는 선로의 수평각을 고려하여 암단으로부터 최소 1,905mm 들어온 위치["765kV 송전용 철탑 설계 및 제조기술 개발" 참조]에서 표준절연간격을 유지하는 것으로 하였다. 수평각 및 미풍에 의한 상시횡진을 감안하여, 현수장치는 15° 지점에서, 내장장치는 5° 에서 표준절연간격을 반경으로 하는 호(弧)를 그려 이 호와 최소절연간격에 해당하는 호를 비교하여 교점 혹은 긴 쪽을 선택하였다.

(2) 최소절연간격

산출거리는 "개폐과전압에 대한 절연" 항목에서 언급한 방법을 적용하였으며, 현수장치는 20° 지점에서, 내장장치는 15° 지점에서 하단암과의 간격 및 탑체와의 간격에 해당하는 호(弧)를 그려 표준절연간격에 해당하는 호와 비교하여 긴 쪽으로 하였으며, V련의 경우는 충전부와 상하단암 및 탑체와의 간격으로 하였다.

(3) 이상시절연간격

상용주파과전압에 견디도록 유지하여야 하는 이상시절연간격은 해발고도에 따라 변화하며, 현수장치는 60° 위치에서, 내장장치는 40° 위치에서 이상시절연간격에 해당하는 호(弧)를 그려 이 호와 최소절연간격에 해당하는 호를 비교하여 큰 값으로 하였다.

(4) 상간절연간격

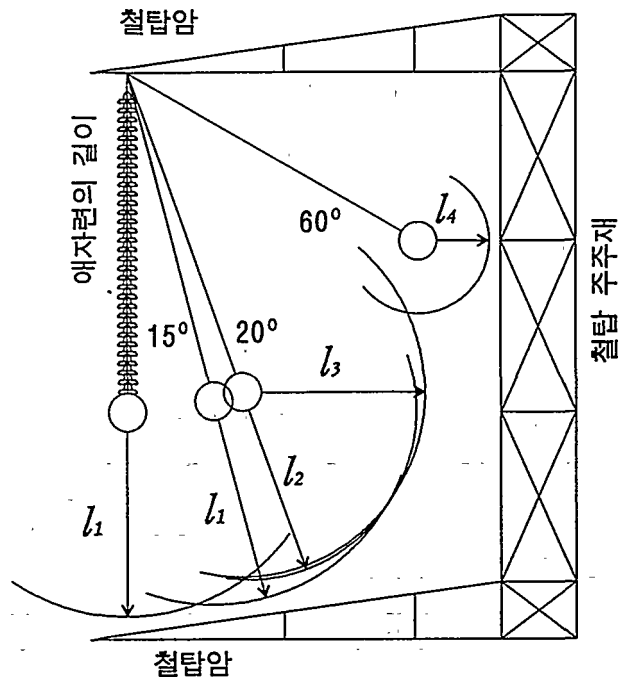
상간절연간격은 수직, 수평 모두 CRIEPI방식에 의한 산출결과를 따랐으며, 실제 적용시는 애자장치, 잠바의 종류, 수평각 및 카테나리각등의 기계적 사항을 고려하여야 한다.

<표 5.21>은 각 공기절연거리(Clearance)를 해발고도별로 요약한 것이다.

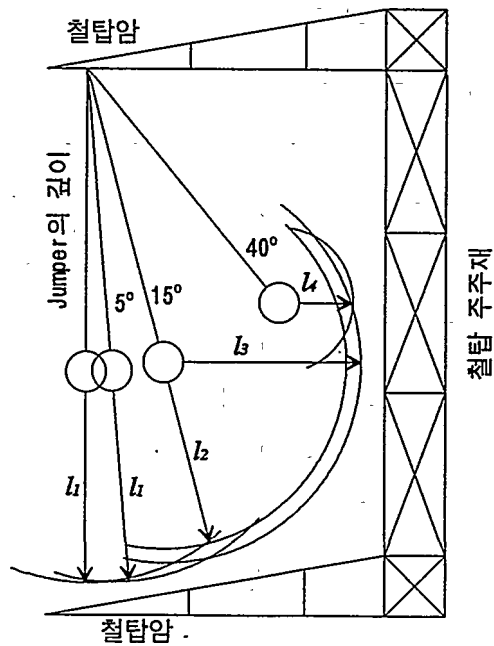
표 5.21 공기 절연 이격거리 (Clearance)

구 분			검 토 안	
			1,000 m	1,300 m
아 킹 혼 간 격 Z (mm)	현 수	애 자 련	4,800	5,000
	V 조	V 조 내	4,600	4,600
	내 장	애자련, 잠바내	4,600	4,600
표준 절연 간격 ℓ_1 $1.115 \cdot Z + 21$ (mm)	현 수	애 자 련	5,380	5,600
	V 조	V 조 내	5,150	5,150
	내 장	애자련혼, Jumper 혼	5,150	5,150
최소절연 간 격 (mm)	현 수	도체 ~ 하단암 ℓ_2	4,530 (4,650)	4,650 (4,770)
		도체 ~ 탑체 ℓ_3	4,900	5,040
	V 조	도체 ~ 하단암 ℓ_2	4,650 (4,900)	4,770 (5,040)
		도체 ~ 탑체 ℓ_3	4,900	5,040
		도체 ~ 상단암 ℓ_6	4,590 (5,260)	4,710 (5,410)
		도체 ~ 하단암 ℓ_2	4,310 (4,770)	4,420 (4,900)
	내 장	도체 ~ 탑체 ℓ_3	4,900	5,040
		도체 ~ 상단암 ℓ_6	4,470	4,590
	이상시 절연간격 ℓ_4 (mm)		1,850	1,930
	상 간 절 연 간 격 ℓ_5 (mm)		8,420	8,640

1. 현수 및 내장형의 () 내는 하단암이 4각암인 경우임.
2. V형은 Arm 폭 2m 기준이며, () 는 Arm폭 7m 인 경우임.



< 현 수 장 치 >

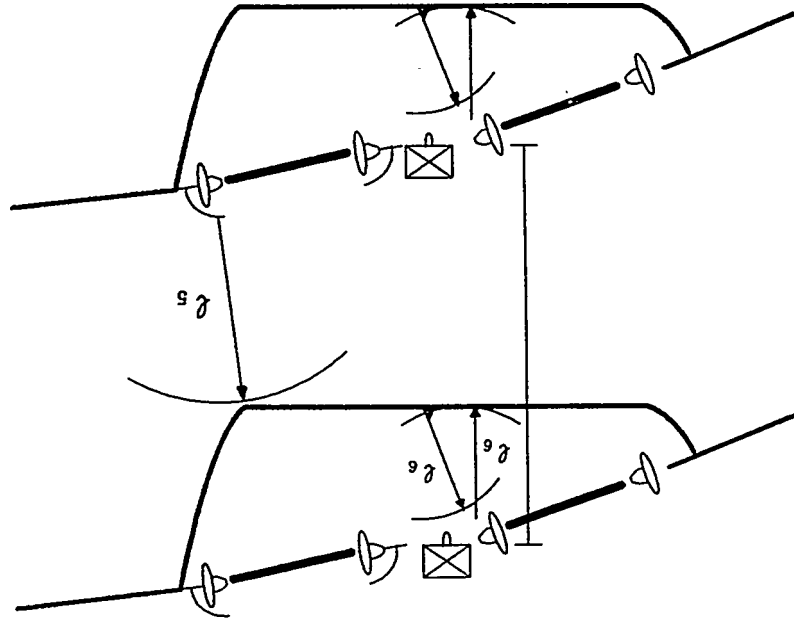


< 내 장 장 치 >

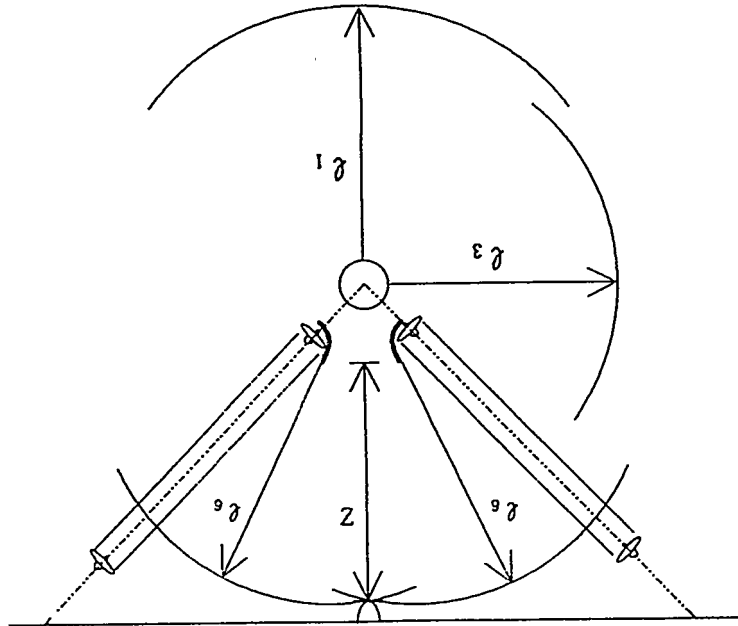
그림 5.8 현수 및 내장 애자장치의 Clearance Diagram

그림 5.9 V 런 애자장치 및 선간 Clearance Diagram

< 선 간 >



< V 런 애자 장치 >



제 6 장 765kV 가스절연 변전소 절연협조

절연협조는 계통을 구성하는 각종 기기 및 설비의 절연강도에 관계된 여러 조건들을 기술, 경제 및 운용상 가장 합리적인 상태가 되도록, 기기 및 설비 상호간의 협조 체제를 구축하기 위한 제반 사항을 포함하고 있는데, 이를 효과적으로 달성하기 위해서는 계통 운전전압, 발생 과전압 및 각종 보호장치 특성 등 여러 조건들을 반드시 고려하여야 한다.

변전소 절연협조에 있어서 가장 일반적인 접근 방법은, 먼저 변전소내에 발생하는 각종 과전압을 피뢰기의 적절한 설치에 의해 일정 수준 이하로 억제하고, 이러한 방법으로 억제된 과전압에 대한 각종 기기들의 절연내력 특성을 감안하여 적절한 절연강도를 선정하는 것이다.

이러한 전력계통 절연협조에 대한 기본적인 개념은 그다지 큰 변화가 없으나, 이를 달성하기 위한 구체적인 수법은 기술 발달, 경제성에 대한 요구 증가에 따라 크게 변화하고 있다. 최근에는 보호특성이 우수한 산화아연형 피뢰기(방전갭이 없는 ZnO 피뢰기)의 개발과 이의 적극적인 활용 및 컴퓨터를 이용한 전력계통 과도현상 해석의 정밀도 향상에 의해, 상세한 검토를 통한 합리적인 절연협조설계를 도모하고 있다.

부록 1.에 IEC 71-1를 기준으로 국내 765kV 송전계통에 관계된 절연협작용어 및 순서를 기술하였으며, 여기에서는 개념의 혼동을 피하기 위해, 가능한 부록 1.의 정의 및 순서를 따라 검토하였다.

제 1 절 765kV 계통용 피뢰기 정격 선정

피뢰기는 변전소내 각종 전력기기들을 썬어지로부터 적극적으로 보호하기 위한 대표적인 장치인데, 송전계통의 변전소내 각종 전력기기들의 뇌썬어지

에 대한 절연협조는 적정 특성을 갖는 피뢰기의 적절한 배치를 기준으로 수행하므로, 각종 전력기기들의 기준절연강도를 선정하기 위해서는 먼저 적용될 피뢰기의 특성 및 설치위치가 먼저 전제되어야 한다.

여기에서는 국내 765kV 가스절연변전소용 갭이 없는 산화금속형 피뢰기의 절연협조에 관련된 요구 특성에 대해 IEC 99-4 (Surge arresters Part 4, 1991-11)를 기준으로 기술하였다.

1. 피뢰기 정격전압(안)

피뢰기 정격전압(Rated Voltage)은, 동작책무시험시에 피뢰기 양단에 가할 수 있는 최대 허용 상용주파 실효치 전압으로써, 통상 계통에 발생하는 상용주파 일시과전압(일선지락 일시과전압)을 근거로 선정된다.

“제 2 장 765kV 계통의 상용주파 일시과전압” 에서 기술한 내용을 토대로 765kV 계통용 피뢰기 정격전압(안)을 <표 6.1>에 나타내었는데, 계통최고전압 800kV 와 일시과전압 배수 1.2 및 0.3 [p.u](변압기 중성점 개방 운전시 일선지락에 의한 중성점 전위상승)로부터 선정가능한 피뢰기 정격전압은 각각 555 및 139kV 이상인데, IEC 99-4 에 의하면 396 ~ 756kV 범위의 피뢰기 정격전압은 24kV 의 배수를 선택하고, 96 ~ 288kV 범위의 피뢰기 정격전압은 12 [kV] 의 배수를 선택하므로 이를 적용하면 국내 765kV 계통용 피뢰기 정격전압(안)은 상도체에는 576kV, 중성점에는 144kV 가 된다.

표 6.1 765kV 계통용 피뢰기 정격전압(안)

계통공칭전압	계통최고전압	일시과전압	피뢰기	비 고
765	800	1.2	576	IEC 선정방법
		0.3	144	변압기 중성점용

2. 공칭방전전류 및 방전등급(안)

피뢰기의 공칭방전전류(Nominal discharge Current)는, 피뢰기 등급 분류에 사용되는 값으로써 뇌임펄스 전류의 파고치로 나타내며, 피뢰기가 가지고 있는 방전내량과는 직접적인 관계가 없다.

IEC 에서는 피뢰기의 공칭방전전류에 대한 표준값으로, 1.5, 2.5, 5, 10, 20 kA 를 채택하고 있으며, IEC 에서 제시하고 있는 정격전압과 표준 공칭방전 전류와의 관계는 <표 6.2>와 같다.

표 6.2 피뢰기 표준공칭방전전류와 정격전압(IEC 99-4)

표준공칭방전전류 [kA]	1.5	2.5	5	10	20
정격전압 [kV]	미정	≤ 36	≤ 132	3 ~ 360	360~756

따라서 국내 765 kV 계통에 적용될 피뢰기의 공칭방전전류는 IEC 에서 제시하고 있는 표준공칭방전전류를 따를 경우, 상도체용은 20kA 로 선정할 수 있으며, 변압기 중성점용은 10kA 로 선정할 수 있는데, 중성점 피뢰기는 설치 특성상 반드시 변압기 권선을 통해 써어지를 방전하게 되므로, 실적용시에는 이보다 낮은 방전등급을 채택하여도 무방하리라 사료된다.

피뢰기의 에너지 방전내량은, 공칭방전전류가 10kA 또는 20kA 인 피뢰기에 대해서 선로방전시험으로 결정된다. IEC 에서 규정하고 있는 선로방전시험은 기충전된 선로를 통해 피뢰기 방전시험을 하는 것으로써, <표 6.3>에 선로방전시험에 적용되는 여러 인수값을 나타내었다.

<표 6.3>으로 주어지는 시험 인수로부터 피뢰기의 선로방전시험시에 피뢰기에 주입되는 에너지 W 를 계산하면,

$$W = U_{res} \cdot (U_L - U_{res}) \cdot 1/Z \cdot T$$

단, U_{res} : 시료의 개폐 임펄스 전류에 대한 최저 제한전압 [kV]

로 된다.

표 6.3 10 및 20 kA 피뢰기의 선로방전시험을 위한 인수값

공칭 방전 전류	선로 방전 등급	선로의 써어지 임피던스 $Z [\Omega]$	파고치의 규약지속시간 $T [\mu s]$	충전전압 U_L [kV, d.c.]
10,000 A	1	$4.9U_r$	2,000	$3.2U_r$
10,000 A	2	$2.4U_r$	2,000	$3.2U_r$
10,000 A	3	$1.3U_r$	2,400	$2.8U_r$
20,000 A	4	$0.8U_r$	2,800	$2.6U_r$
20,000 A	5	$0.5U_r$	3,200	$2.4U_r$
* U_r : 시료의 정격전압				

피뢰기 선로방전등급과 방전에너지

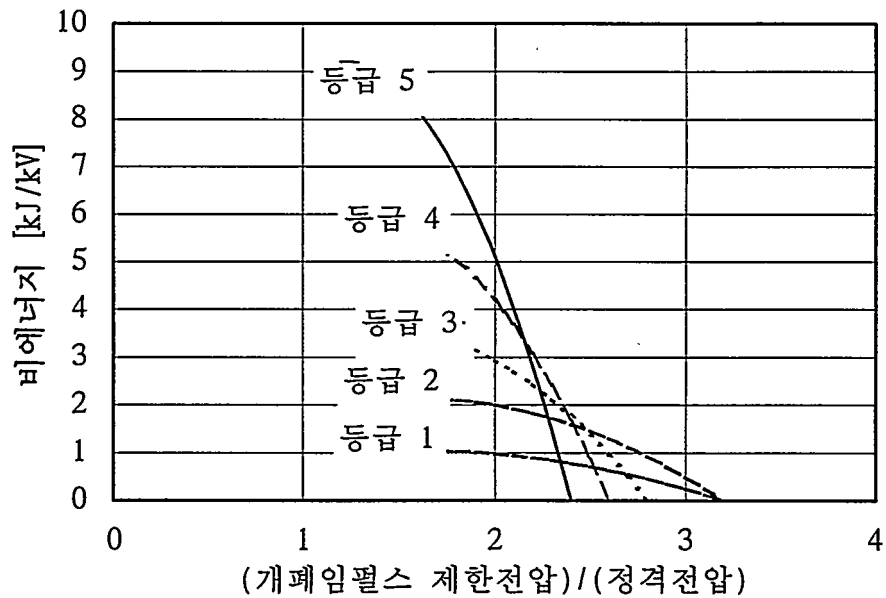


그림 6.1 피뢰기의 선로방전등급과 비에너지 특성곡선

위 식으로부터 비에너지(Specific Energy : 피뢰기의 선풍방전시험시에 주입되는 에너지를 시료의 정격전압으로 나눈 값으로써 단위는 $[kJ/kV]$ 이 된다.)와 U_{res}/U_r (개폐 임펄스에 대한 제한전압/정격전압)과의 관계그래프를 도출하면 <그림 6.1>과 같다. 따라서 대상 피뢰기의 방전등급은, 대상 계통에 발생되는 썬어지에 의한 피뢰기 방전에너지를 <그림 6.1> 위에 투영시키고 각 곡선과의 상관위치에 의해 결정할 수 있다.

가. 대상 계통에서의 피뢰기 흡수 에너지

피뢰기에 의해 억제되는 주대상 썬어지는 뇌썬어지인데, 뇌썬어지는 방전전류의 파고치는 매우 크나 지속시간이 수십 μs 정도로 매우 짧기 때문에 피뢰기에 의해 흡수되는 에너지량은 비교적 낮은 값이 된다. 이에 비해 개폐썬어지에 의한 피뢰기의 흡수에너지는, 비록 방전전류 크기는 작으나 지속시간이 매우 길기 때문에 통상 뇌썬어지 방전시보다 많아지게 된다.

<그림 6.2> 및 <그림 6.3>에 각각 뇌썬어지 방전시 피뢰기 방전전류 및 흡수 에너지의 대표적인 예를 도시하였는데, 피뢰기의 뇌썬어지 방전시에는 대략 수십 kJ 정도의 작은 에너지를 흡수하게 됨을 알 수 있다.

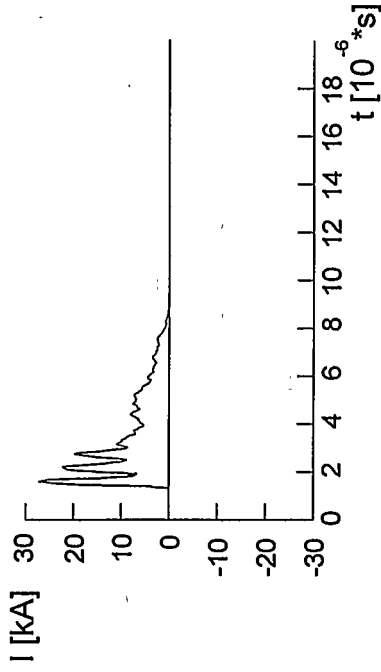


그림 6.2 피뢰기의 뇌썬어지 방전전류

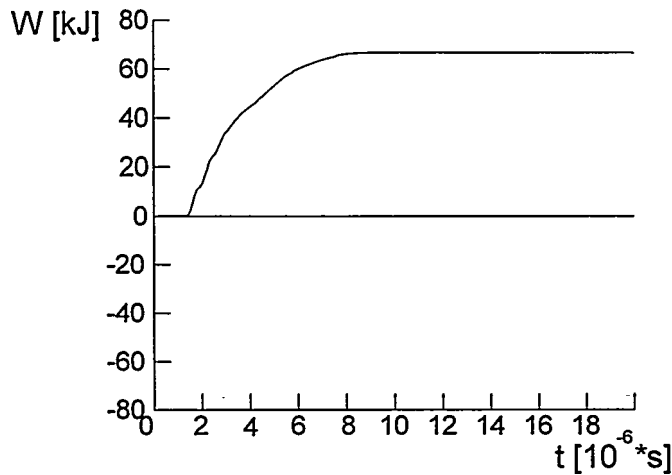


그림 6.3 피뢰기의 뇌써어지 방전시 흡수 에너지

변전소에는, “제 4 장 765kV 가스절연 변전소의 뇌과전압”에서 기술한 바와 같이, 선로 인입부, 모선부 및 변압기단 등 상당히 많은 개소에 피뢰기가 설치되므로, 지락 고장, 고장 차단시 및 선로투입시(재투입 포함) 송전단에는 매우 많은 피뢰기가 접속된다. 따라서 선로 재투입시 수전단에 설치되어 있는 피뢰기가 가장 많은 방전에너지를 담당하게 된다.

<그림 6.4> 및 <그림 6.5>에 150 km 선로 재투입시(저항투입실패) 선로 수전단에 설치되어 있는 피뢰기의 방전전류 및 흡수에너지를 100 회의 확률 계산으로부터 도출한 결과를 도시하였으며, 기타 다른 요인에 의해 발생하는 개폐써어지(차단 또는 지락 등에 의한 개폐써어지)에 의한 피뢰기 흡수에너지는 수십 내지 수백 kJ 정도로 저항투입실패시 재투입에 의한 써어지 방전에 비해 상당히 낮은 값으로 나타났다.

제 4 장에서 기술한 피뢰기 설치위치(안)에서 검토된 바와 같이 선로 인입부에는 최소 2조의 피뢰기가 설치되므로, 이를 감안하면 실제 선로 재투입시 수전단 피뢰기가 방전하여야 할 에너지량은 <그림 6.5>에 나타낸 해석 결과의 1/2 이하가 된다.

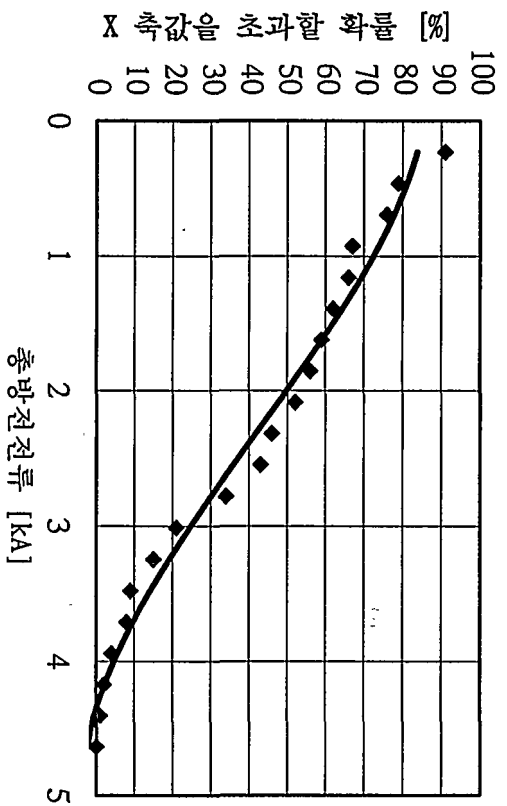


그림 6.4 개폐싸여지(재투입싸여지)에 의한 피뢰기 방전전류

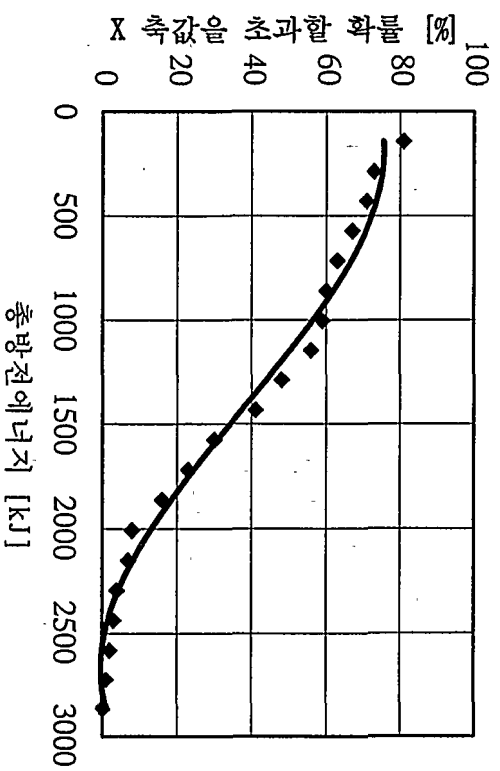


그림 6.5 개폐싸여지(재투입싸여지) 방전시 피뢰기 흡수에너지

나. 피뢰기 공칭방전전류 및 방전등급(안)

<그림 66>에 피뢰기의 방전특성과 대상 계통에서의 피뢰기 흡수에너지와 상관관계에 대해 도시하였는데, 대상 계통에서의 피뢰기 흡수 에너지 영역 (<그림 66>에서 빗금친 부분)은 다음과 같은 조건하에서 결정하였다.

- 개폐 임펄스 전류에 대한 피뢰기 제한전압은 뇌 임펄스 전류에 대한 제한전압에 비해 약 5 ~ 10 % 정도 낮다.
- 선로 인입부에 최소 2조의 피뢰기가 설치된 것으로 간주한다.
- 피뢰기 정격전압은 576kV로 가정한다.

피뢰기의 선로방전시험으로 표현되는 방전특성과 대상 계통내에서의 피뢰기 흡수 에너지에 대해 검토한 결과를 토대로 국내 765kV 계통에 적용될 피뢰기의 공칭방전전류 및 선로방전등급(안)을 <표 6.4>에 나타내었다.

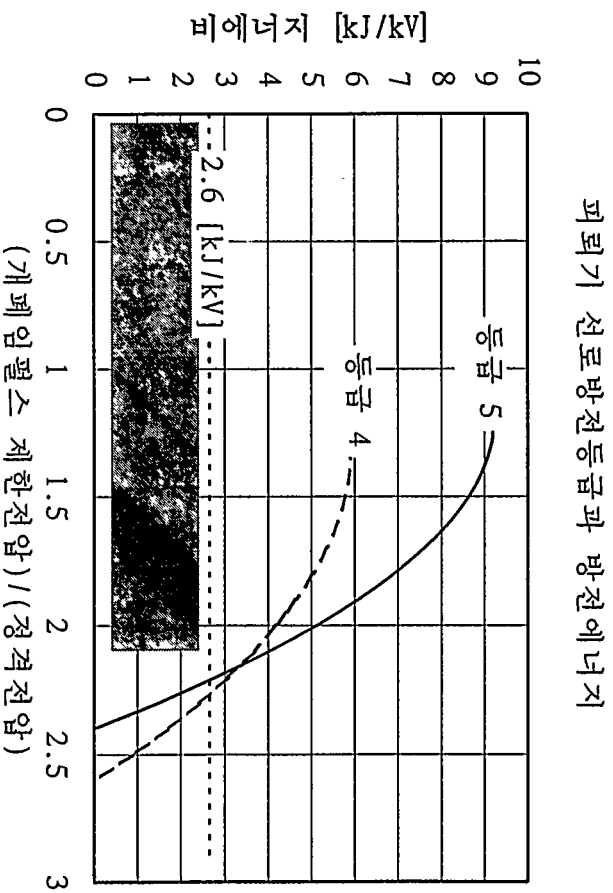


그림 66 피뢰기의 선로방전등급 판단 그래프

표 6.4 765kV 계통 피뢰기의 공칭방전전류 및 방전등급(안)

용 도	공칭방전전류(안)	선로방전등급(안)
상도체용	20kA	4
중성점용	10kA	1

3. 피뢰기의 보호특성(안)

갭이 없는 산화금속형 피뢰기의 보호특성은

- 급준파 전류에 대한 제한전압
 - 뇌 임펄스에 대한 제한전압-전류 특성 : 공칭방전전류에 대한 최대 제한전압을 피뢰기의 뇌 임펄스 보호레벨이라 칭한다.
 - 개폐 임펄스에 대한 제한전압 : 특정 개폐 임펄스 전류에 대한 최대 제한 전압을 피뢰기의 개폐 임펄스 보호레벨이라 칭한다.
- 의 3가지에 의해 표현된다.

<표 6.5>에 제 3 장 및 제 4 장 에서 검토한 각종 써어지 해석 결과를 토대로 765kV 계통 계통용 피뢰기의 보호특성(안)을 다음과 같이 제시하였다.

<표 6.5>에서 급준파에 전류에 대한 제한전압 특성은 가스절연기기의 전압-시간 특성을 고려하여 뇌 임펄스 보호레벨의 1.1배로 상정하였으며, IEC에서 규정하고 있는 개폐 임펄스 제한전압 시험을 위한 방전전류 파고치를 근거로 하여 상도체용 피뢰기의 개폐 임펄스 보호레벨은 방전전류 2 kA 때의 최대 제한전압으로, 중성점용 피뢰기의 개폐 임펄스 보호레벨은 방전전류 500 A 때의 최대 제한전압으로 상정하였다.

또한 <표 6.5>에서 상도체용 피뢰기의 뇌 임펄스 보호레벨은 20kA의 방전 전류에 대한 최대 제한 전압을 나타내고 있는데, 이를 현재 국내 345kV 계통에 적용하고 있는 피뢰기의 뇌 임펄스 보호레벨과 상호비교하면 다음과 같다.

현행 국내 345kV 계통에 적용하고 있는 피뢰기는 정격전압 288kV, 공칭방전전류 10kA, 뇌 임펄스 보호레벨 690kV로 규정(한국전력표준규격, ESB 153-261-282 참조)하고 있는데, 이를 선형 확대 적용하면 정격전압 576kV, 공칭방전전류 20kA 피뢰기의 뇌 임펄스 보호레벨은 1380kV(뇌 임펄스 보호레벨은 공칭방전전류에 대한 최대 제한전압으로 표시하므로 방전전류 조건이 다르게 되나, 공칭방전전류가 커지게 되면 통상 보호특성도 우수하게 되므로 이를 감안하면 공칭방전전류에 관계없이 뇌 임펄스 보호레벨을 동일한 배수로 상정할 수 있다.)가 되는데, <표 6.5>에 나타난 뇌 임펄스 보호레벨은 1,310kV이므로, 이는 현행 345kV 계통용 피뢰기에 대한 규정에 비해 제한전압 특성이 약 95 %($100 * 1,310/1,380$) 로 향상된 것이다. 그런데 갭이 없는 산화금속형 피뢰기의 특성이 초기에 비해 매우 발전하였으므로, 실제 적용될 피뢰기의 보호레벨은 <표 6.5>의 값보다 훨씬 우수할 것으로 사료되므로, 대상 기기의 안전율(정격절연강도 / 보호레벨)을 보다 높게 확보할 수 있을 것이다.

표 6.5 765kV 계통용 피뢰기 보호특성(안)

종 류	급준과 제한전압	뇌 임펄스 보호레벨	개폐 임펄스 보호레벨
576kV, 20kA (상도체용)	1,440kV	1,310kV	1,200kV
144kV, 10kA (중성점용)	343kV	312kV	248kV

제 2 절 765kV 가스절연 변전소의 절연강도 선정

제 3 장 및 제 4 장에서 검토한 대상계통에서의 과전압 발생양상 및 전술한 피뢰기 정격(안)을 토대로 765kV 가스절연 변전소내의 각종 기기에 대한 정격절연강도(안)를 다음과 같이 선정하였다.

1. 대표 과전압 선정

<표 6.6>에 제 2 장, 제 3 장 및 제 4 장에서 검토한 결과를 토대로 대상 변전소 절연설계를 위한 대표 전압 및 과전압(안)을 나타내었다.

이 때 각 대표 전압 및 과전압 선정시의 선정조건은 <표 6.7>과 같다.

2. 협조 내전압 선정

대표 과전압으로부터 협조 내전압을 구하기 위해서는 적절한 값의 협조계수를 상정하여야 하는데, 이는 해석 결과의 정확도를 감안하여 경험적으로 산정할 수 있다.

표 6.6 대표 과전압(안)

종 류	값 [kV]	비 고
상용주파 연속전압	462	상대지간 계통 최고 전압, 실효치
완만파 대표 과전압	1,176	개폐과전압
급준파 대표 과전압	1,590~1,930	뇌과전압, 기기별로 다르게 선정
완만파 상간 대표 과전압	2,287	상간 개폐과전압

표 6.7 대표 과전압 선정시 상정 조건

대표 과전압	상 정 조 건	
개폐과전압	저항투입실패시 재투입과전압	
뇌과전압	뇌격전류	170 kA, 1/70 μ s
	뇌격침입형태	제 1 철탑에서의 역섬락
	철탑접지저항	15 Ω
	변전소구성	2 중모선, 1.5 차단방식, Full GIS

여기에서는

- 제 2 장의 검토 결과로부터, 일선지락 및 2 선지락 고장시 건전상의 전위상승은 고장지점에서의 건전상에서 가장 높게 나타나며, 변전소 부근의 전위상승은 그다지 높아지지 않음을 알 수 있다.
- 완만파 대표 과전압(개폐과전압) 선정시 상정조건을 저항투입실패시 3상 재투입과전압(선로잔류전압 0.8 p.u)을 상정하였는데, 현재 실제통운용시 다상재투입 및 고속접지개폐기 등의 적용이 적극 검토되고 있으므로 이를 감안하면 상정조건은 매우 가혹한 조건으로 볼 수 있다.
- 뇌과전압 해석 조건에서 상정뇌격을 170kA, 1/70 μ s 으로 두었는데, 이는 국내 뇌격빈도와 외국의 예를 비교하여 추정하면 거의 최악의 조건을 상정한 경우로 볼 수 있다.
- 해석에 사용된 EMTP(Electro-Magnetic Transient Program : 범용 전력계통 과도현상 해석 프로그램)의 해석 정밀도와 전력기기의 모의방법이 선진 외국에서 상당 기간 검증되었으므로 이를 이용한 해석 정확도도 매우 높다고 볼 수 있다.

등의 이유로 협조계수를 1 로 두는 것이 타당할 것으로 사료된다.

3. 정격 절연 강도(안) 선정

상정된 협조 내전압으로부터 기기가 반드시 견디어야 하는 필수 내전압을 도출하기 위해서는 시험 조건과 실제 운용 조건과의 차이를 고려한 안전계수를 선정하여야 하는데, 이러한 안전계수는 다분히 경험적으로 선정된다.

협조 내전압으로부터 적절한 안전계수를 고려하여 필수 내전압이 결정되면, 이를 토대로 표준 내전압을 선정하게 되는데, 버 임펠스에 대해서는 변전소내 각 기기에 발생하는 뇌파전압 크기가 다르므로 각 기기별로 선정하였다. <표 6.8>에 정격 절연 강도(안)을 나타내었다.

표 6.8 정격 절연 강도(안)

종 류	표준 내전압 [kV]	비 고
개폐 임펠스	1,425(1,500)*	안전계수 ≥ 1.2
버 임펠스	변압기	안전계수 ≥ 1.2
	모선 및 스위치 기어부	안전계수 ≥ 1.15
	고속접지스위치	안전계수 ≥ 1.2
* 개폐 임펠스에 대한 표준 내전압 중 () 내의 값은 변압기 적용하는데, 변압기 저압측(기존 345kV 계통) 과의 일관성을 유지하기 위해 ANSI 규격을 적용.		

4. 피뢰기의 보호특성과 정격 절연 강도와의 상관관계

절연협조 및 절연설계 관점에서 피보호 전력기기를 분류하면

- 피뢰기 등의 보호기기에 의해 직접적으로 보호받는 기기(첫번째 부류)와
- 그 외의 기기(두번째 부류)

의 2 종류로 나눌 수 있는데, 첫번째 부류의 대표적인 예는 보호용 피뢰기가 설치된 변압기가 있으며, 두번째 부류의 대표적인 예는 스위치류 및 모선부 등을 들 수 있다.

첫번째 부류에 대한 합리적인 절연협조는 대상 기기의 절연 강도와 보호용 피뢰기의 보호레벨 간의 긴밀한 협조에 의해 달성할 수 있는데, IEC 등에서 제안하고 있는 통례에 따르면 첫번째 부류에 속하는 기기의 정격 절연 강도의 피뢰기 보호레벨에 대한 안전율은 개폐 임펄스에 대해서 1.15 이상, 뇌 임펄스에 대해서 1.25 이상을 채택하고 있다.

앞서 검토한 765kV 가스절연변전소의 정격 절연 강도(안)(첫번째 부류에 속하는 기기, 즉 변압기에 대한 정격 절연 강도)과 피뢰기 보호레벨(안)을 상호 비교하면 <표 6.9>와 같이 충분한 안전율을 확보하고 있음을 알 수 있다.

표 6.9 피뢰기 보호레벨과 변압기 정격 절연 강도(안) 비교

종 류	정격절연강도(안)	보호레벨(안)	안전율
개폐 임펄스	1,500kV	1,200kV	1.25
뇌 임펄스	1,050kV	1,310kV	1.56

제 3 절 765kV 용 변압기의 중성점 절연

전력용 변압기를 절연형태에 따라 구분하면,

- 균등절연(Uniform Insulation) 변압기 : 모든 단자의 절연을 균등하게 설계한 변압기
- 차등절연(Non-uniform Insualtion) 변압기 : 대지에 직접적으로 또는 간접적으로 접속되는 중성점 단자의 절연을 상도체용 단자의 절연보다 낮게 설계한 변압기

의 2가지로 구분할 수 있다.

기기최고전압이 300kV 이상인 변압기는 대부분 차등절연 변압기로 설계되고 있으며, 차등절연 변압기의 중성점은 직간절적으로 대지에 접속되는데, 간접적으로 대지에 접속할 경우에는 과도전압(개폐 및 뇌과전압 등)을 억제하기 위해 중성점 단자와 대지간에 적절한 보호장치를 설치하여야 한다.

<표 6.10>에 국내 765kV 계통에 사용될 변압기의 중성점 정격절연강도(안)을 <표 6.10>에 나타내었으며, 정격절연강도(안)은 피뢰기의 뇌임펄스 보호레벨에서 안전을 1.25 이상을 고려하여 표준 뇌임펄스 내전압치로부터 선정하였으며, 단시간 교류 내전압(안)은 정격절연강도(안)으로부터 IEC 에서 권장하고 있는 단시간 교류 내전압과 정격절연강도 간의 관계를 이용하여 선정하였다.

표 6.10 765kV 용 변압기의 중성점 정격절연강도(안)

항 목	값	비 고
중성점용 피뢰기 정격전압	144kV	
중성점용 피뢰기 보호레벨	312kV	뇌임펄스 보호레벨
정격절연강도(안)	450kV	안전율 ≥ 1.25
단시간 교류 내전압(안)	185kV	정격절연강도로부터 추정

제 7 장 고유과도회복전압 및 고속접지개폐기

과도회복전압은 차단기가 고장전류를 차단할 때 차단기 극간에 발생하는 과도전압을 일컫는 것으로써 차단기의 차단성능 평가에 중요한 요인이 되므로, 765kV 송전계통에 적합한 차단기를 선정하기 위해서는 대상 계통에 발생하는 과도회복전압에 대한 검토가 선행되어야 한다.

고속접지개폐기(High Speed Grounding Switch, HSGS)는 지락고장에 의한 2차 아크를 빠른 시간내에 소호하여 송전선로를 원할하게 재투입하기 위해 적용하는 것으로써 차단기와 유사한 동작을 하게 된다. 고속접지개폐기를 본래의 목적에 적합하게 동작시키기 위해서는, 고속접지개폐기 동작시 발생하는 과도현상에 대한 충분한 사전 검토를 통해 원치않는 비정상적인 동작을 미연에 방지하여야 한다.

여기에서는 765kV 계획 계통에 대한 적절한 모델을 선정하여, 모델 계통에서의 과도회복전압 특성을 검토하였으며, 고속접지개폐기에 대해서는 차단전류 및 과도회복전압과 영점추이현상에 대해 대표적인 모델을 선정하여 검토하였다.

제 1 절 고유과도회복전압

1. 정의 및 중요성

가. 고유과도회복전압 정의

전력계통의 차단기는 고장발생시 계전기의 트립신호에 의해서 고장구간을 전계통으로부터 신속하게 분리시키기 위하여 사용되어진다. 이러한 차단기의 차단성능은 고장전류 크기 및 전류차단시 차단기 극간에 인가되는 과도회복전압에

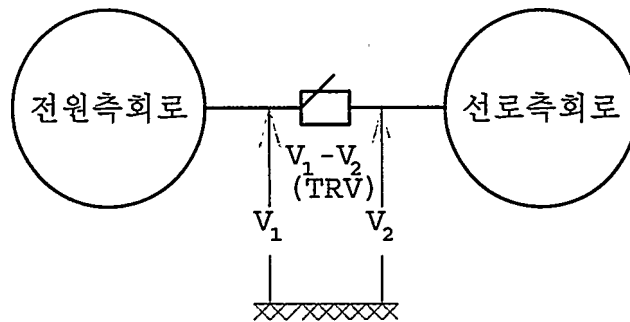
의해 좌우된다. 차단기가 계통을 분리하기 위해 전류를 차단할 경우에는 계통의 유도성 회로에 축적되어 있는 자속때문에 차단기 극간에는 아크가 발생되므로 차단기는 이러한 아크에 의한 제점호를 소호할수 있어야만 차단에 성공할 수 있다.

따라서 차단기 관련규격 및 사양에서는 차단기가 고장전류 차단시에 필요한 아크 소호능력을 요구하고 있으며 전류차단후 <그림 7.1>과 같이 차단기 양극간에 발생하는 전압에 대하여도 절연내력을 유지하여야 한다. 이러한 전압을 회복전압(Recovery Voltage)이라 하며 이 전압은 과도영역 및 상용주파영역으로 구분가능하다. 여기서 초기 과도특성을 나타내는 회복전압 영역을 과도회복전압(Transient Recovery Voltage, TRV)이라고 정의한다. 이러한 과도회복전압은

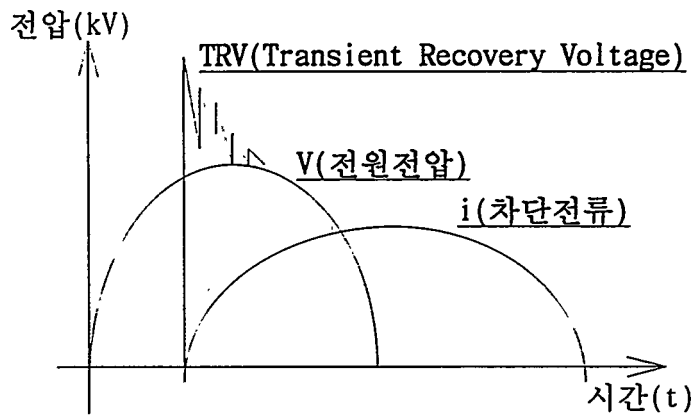
- 1) 계통의 특성
- 2) 고장종류 및 특성
- 3) 차단기의 특성

등에 따라서 그 형태가 매우 다양하므로 시험규격 또는 실계통 적용을 위한 차단기 사양 작성시에는 위의 항목중 2), 3) 항은 일정하게 두고 순수한 계통 특성에 의한 과도회복전압을 파악할 필요성이 있다.

이러한 목적으로 일정 고장형태(3상지락 혹은 단락)를 이상적인 차단기로 직류성분이 없는 회로의 고유전류(Prospective Current)를 차단하여 계통특성에 의해서만 결정되는 과도회복전압을 고유과도회복전압(Prospective Transient Recovery Voltage, PTRV)으로 정의한다. 여기서 이상적인 차단기란 전류 영점에서 차단기 극간 임피던스값이 0 에서 무한대로 순간 변화하여 차단기의 아크 특성을 무시할수있는 차단기를 의미한다. 즉, 차단기 정격선정을 위한 계통검토시에는 차단기의 특성을 무시한 고유과도회복전압을 해석하고 이것을 규격치와 비교 검토하는것이 일반적이다.



(가) 차단기개방시 양극간 전압



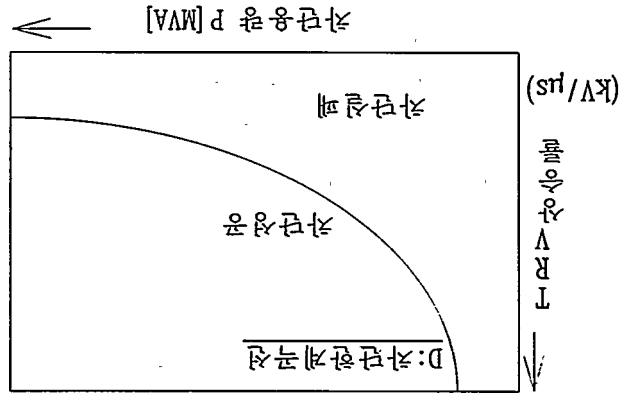
(나) 고유 TRV 파형형태

그림 7.1 고유과도회복전압(PTRV) 정의

나. 고유과도회복전압과 차단성능

계통에 고장이 발생하였을때 차단기의 전류차단시 발생하는 고유과도회복전압은 차단용량과 함께 차단성능에 큰 영향을 미친다. 이러한 고유 과도회복전압은 크게 초기부분과 파고부분으로 분류가능하다. 고유과도회복전압의 초기부분(계통구성에 따라서 다르나 대체로 수백 μ s 정도)에서는 대단히 높은 과도전압 상승률로 인해 차단기의 열적차단실패(Thermal Failure)가 야기될수 있고, 파고부분(1 ~ 수 ms)에서는 최대과도전압이 차단기 극간에 가해지므로 차단기의 극간 절연내력 회복능력을 초과하는 경우 절연파괴(Dielectric Failure)가 발생하여 차

그림 7.2 차단기의 차단한계곡선



단선패를 조래할 수 있다.

따라서 고유파도회복전압 파형 분석시 초기부분에서는 파도전압상승률(kV/μs)이 중요하며 파고부분에서는 고유파도회복전압 파고치(kV)만 의미를 가지며 전압상승률은 차단성능에 큰 영향을 미치지 못한다. 그리고 최근의 타력소호능력을 가진 고성은 차단기의 차단한계곡선인 <그림 7.2>에서도 알 수 있듯이 정격 차단용량과 정격 고유파도회복전압은 밀접한 관계가 있으며 차단한계곡선인 D가 $[(kV/\mu s) \times [MVA] = \text{원정})$ 이라는 등식이 성립하면 고유파도회복전압도 차단용량과 같이 차단기의 크기 혹은 가격에도 관련이 있음을 알 수 있다.

<그림 7.3>과 같이 두 차단기의 차단한계곡선이 각각 D_1, D_2 이고 계통특성이 A, B, C 인 경우를 비교하면 다음과 같다.

<그림 7.3>에서 차단한계곡선이 D_1 인 차단기는 계통특성이 A 인 경우에는 차단용량 P_1 을 차단가능하지만 계통특성 B 에 대해서는 동일 차단용량인 P_1 을 차단할 수 없다. 이것은 계통특성이 B 인 경우에는 차단용량이 P_1 일때 고유파도회복전압 상승률이 차단한계곡선인 D_1 을 초과하기 때문이다. 그러나 차단한계곡선이 D_2 인 차단기의 경우에는 계통특성 B 에 대해서 차단용량 P_2 을 차단할 수 있다.

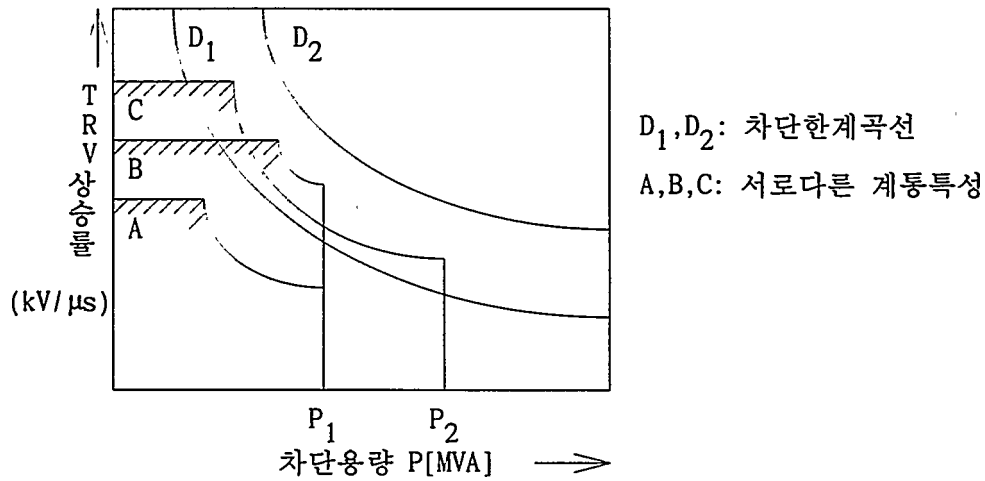


그림 7.3 차단한계곡선과 계통특성과의 관계

2. 고유과도회복전압 규격 관련사항

가. 규격 적용방안 검토

현재 통용되는 차단기 관련규격은 IEC-56, ANSI C37.06 으로 대별되며 세계 각국은 대체적으로 자국의 차단기 관련 규격을 위의 두가지 규격에서 원용하여 적용하고 있는 실정이다. 위의 두 규격은 상호간에 약간의 상이점을 지니고 있는데 그 이유는 IEC 규격이 주로 적용되는 유럽제국과 북미 위주의 ANSI 규격이 적용되는 지역의 계통특성이 서로 상이할 뿐 만 아니라 IEC는 실측치에 근거를 두고 있지만 ANSI는 모델계통에 대한 해석치에 근거를 두고 있기 때문이다. IEC 및 ANSI 규격의 근본적인 차이점은 다음과 같다.

- 파형표시방법 : ANSI에서는 72.5kV 이하의 계통에 대해서는 단일전원으로부터 고장전류가 공급되는 단순계통으로(1-cosine 파형), 121kV 이상의 계통에 대해서는 변압기 및 송전선로에 의해 고장전류가 공급되는 복합계통(exponential-cosine 파형)으로 가정함으로써 이때의 과도회복전압 파

형을 이론적으로 정의하고 있다. 그러나 IEC에서는 실제계통에서 간단한 수식으로 표현할수 있는 파형을 얻는 일이 어렵다는 사실을 인지하여 2-parameter 또는 4-parameter 방법에 의해 과도회복전압 파형을 정의하고 있다. 따라서 ANSI에서는 실제계통에서 발생하는 파형형태를 정의하고 IEC에서는 파형형태를 측정한다고도 말할 수 있다.

- 상승률 : IEC에서는 100kV 이상의 차단기에 대해 과도회복전압 상승률 (Rate of Rise of Recovery Voltage, RRRV)을 일정한 값으로 규정하고 있지만 ANSI에서는 정격전압 및 정격차단전류에 따라 서로 상이한 값으로 규정하고 있다.
- 파고시간 : IEC 규격에서는 각 정격전압별로 접지/비접지계통에 대한 1개의 파고시간을 정의하는 반면 ANSI 규격에서는 동일 정격전압에 대해서도 정격 차단전류가 다른 경우 서로 상이한 파고시간을 규정하고 있다.
- 파고전압 : 대체적으로 동일 정격전압에 대해서 ANSI의 파고치가 IEC 규격보다 약간 높다. 그 이유는 양 규격간의 기본가정이 약간 상이하고 ANSI가 해석치를 근거로 하는데 반해 IEC는 실측치를 염두에 두기 때문이다.

지금까지 IEC/ANSI 규격의 기본적인 차이점을 기술하였는데 ANSI 보다는 IEC 규격이 전세계적으로 더 보편화 되어있으며 실제계통운용 관점에서도 적합하다고 생각된다. 또한 현재의 한전 차단기 관련규격인 ESB-150 규격도 IEC를 모태로 제정되어 있고 현재 운용중인 362[kV] 이하의 차단기도 IEC 규격을 따른것이다.

따라서 한전 800kV 급 차단기의 과도회복전압 규정도 IEC 규격을 따르는 것이 적합하리라고 생각된다. 이 경우 문제가 되는 사항은 IEC 규격에서는 정격전압 765kV 급 차단기(계통공칭전압:735kV)만 규정되어 있을뿐 800kV 급 차단기(계통공칭전압:765kV)에 관한 사항은 존재하지 않는다는 점이다. 그러나 앞에서도 기술했듯이 IEC 규격의 근본개념이 과도회복전압 상승률의 경우 100kV 이상의 계통에서는 동일하며($2.0[kV/\mu s]:100\%$ 전류차단시), 파고치도 정격전압에 일

정배수의 제 1 상 차단계수(접지계통:1.3,비접지계통:1.5) 및 진폭률(계통특성에 따라서 1.4-1.7)을 곱하여 구해지므로 800kV 급 차단기의 고유과도회복전압 해석시 IEC 규격과의 피상적인 비교분석은 가능하리라고 추정된다.

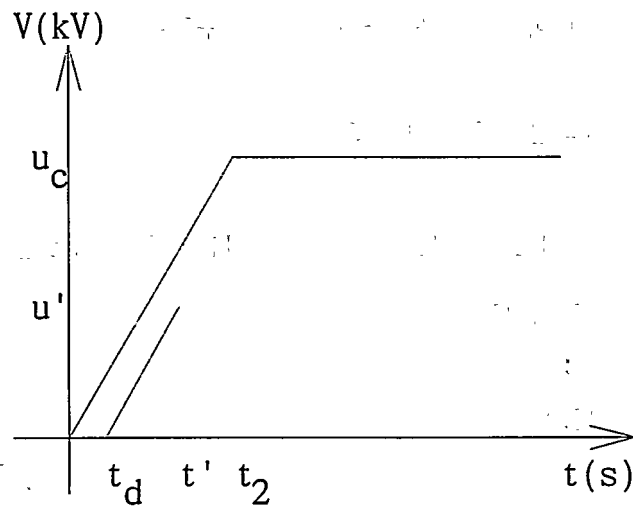
나. IEC 의 과도회복전압 규격치 개요

(1) 규격치 근거

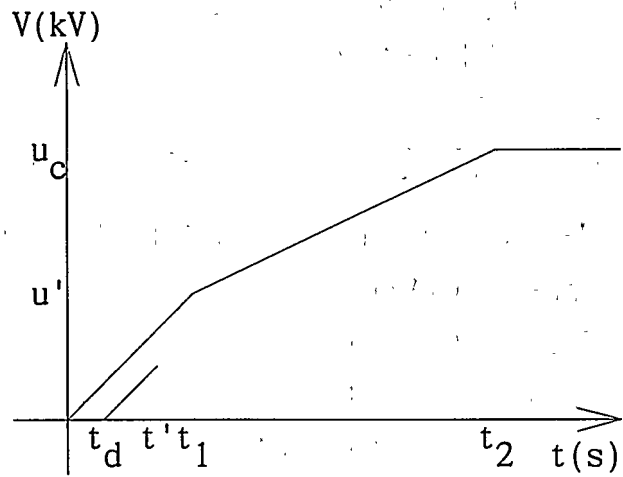
IEC 규격의 단락시험시 고유 과도회복전압 계산근거를 살펴보면 다음과 같다.

- 고장종류 : 3 상 접지고장
- 제 1 상 차단계수 :
 - 계통전압 $\leq 72.5\text{kV}$:1.5
 - $100\text{kV} \leq \text{계통전압} \leq 170\text{kV}$:1.3 (접지계통) 혹은 1.5(비접지계통)
 - 계통전압 $\geq 245\text{kV}$: 1.3 (Duty 1&2 에서는 1.5 를 적용하기도함)
- 진폭률:
 - 100% 정격 단락전류(Duty 4 & 5) : 1.4
 - 60%(Duty 3) 및 30%(Duty 2) 정격 단락전류 : 1.5
 - 10%(Duty 1) 정격 단락전류 : 1.7
- 고유과도회복전압 파고치:

$$(\text{차단기 정격전압}) \times \left(\sqrt{2}/\sqrt{3}\right) \times (\text{제 1 상 차단계수}) \times (\text{진폭률})$$
- 과도회복전압 상승률(kV/ μs) : 정격전압 100kV 이상에서는 일정
 - 100% 정격단락전류 : 2.0[kV/ μs]
 - 60% 정격단락전류 : 3.0[kV/ μs]
 - 30% 정격단락전류 : 5.0[kV/ μs]
 - 10% 정격단락전류 : 5.5 - 12.6[kV/ μs]
- 근거리 송전선로 고장시(SLF)의 정격 선로특성치 :
 - 선로의 썬지 임피던스 : 450 Ω
 - 진폭률 : 1.6



(가) 2-parameter



(나) 4-parameter

그림 7.4 IEC의 과도회복전압 파형 표시방법

(2) 파형 표시방법

앞에서도 기술하였듯이 IEC 규격에서는 고유과도회복전압 파형을 표시하기 위하여 정격전압 72.5kV 이하의 모든 단락전류 차단시와 100kV 이상의 10% 정격단락전류에 대해서는 <그림 7.4 (가)>와 같은 2-parameter 법을, 또한 100kV 이상의 100%, 60% 및 30% 정격단락전류일 경우에는 <그림 7.4 (나)>와 같은 4-parameter 법을 적용하고 있다.

(3) 규격치

IEC 규격에 명시되어 있는 모든 정격전압별 과도회복전압 규정치는 참고문헌 (IEC-56)을 참조하기 바람이며 여기서는 검토대상과 관련있는 정격전압 765[kV]급 차단기의 과도회복전압 규격치중에서 과도회복전압 상승률과 파고치에 대해서 나타내면 <표 7.1>과 같다.

3. 765kV 계통 과도회복전압 검토

가. 해석대상계통 및 해석조건

(1) 대상계통

<그림 7.5> 765kV 축약계통/<그림 7.6> 주변 345kV 포함계통

(2) 고장종류

3 상지락고장 및 1 상지락고장

(3) 고장위치

765kV 모선 및 차단기 선로측

표 7.1 765[kV] 차단기 과도회복전압 규격치

Duty No.	RRRV (kV/μs)	t ₁ (μs)	u ₁ (kV)	t ₂ (μs)	u _c (kV)	t' (μs)	u' (kV)	t _d (μs)
Duty 4&5(100%)	2.0	406	812	1,218	1,137	205	406	2
Duty 3(60%)	3.0	271	812	1,220	1,218	137	406	2
Duty 2(30%)	5.0	162	812	1,215	1,218	167	406	86
Duty 1(10%)	12.6			114	1,434	52	478	14
*1) Duty 4&5는 100% 정격차단전류로써 동일하나 직류분 존재(Duty 5),대칭전류차단(Duty 4)으로 구분된다. *2) t₁(초기파고시간),u₁(초기파고치),t₂(파고시간),u_c(파고치) *3) Duty 1만 2-parameter 파형이고 나머지는 4-parameter 적용 *4) $RRRV = \frac{u'}{t' - t_d} = \frac{t_1}{u_1}$ *5) $u' = \frac{1}{2}u_1$ (Duty 2-5) 혹은 $\frac{1}{3}u_c$ (Duty 1)								

(4) 해석데이터

(가) 전원 임피던스와 변압기의 저항분을 리액턴스값의 10% 로 고려하여 검토

(나) 변압기 2 차측 고장시에는 과도회복전압 파형에 변압기 자체의 공진주파수 때문에 높은 과도회복전압 상승률이 발생가능하므로 변압기의 1-BANK 당 권선-대지간 및 권선간 누설 커패시턴스를 아래와 같이 가정하였다.

- 765kV 발전단 Step-up 변압기(<그림 7.5>,A 765kV S/S)누설커패시턴스:

- CHG(고압권선-대지)= 70[nF]
- CLG(저압권선-대지)+ 발전기 정전용량= 500[nF]
- CHL(고압권선-저압권선)= 60[nF]
- 765/345/23kV 변압기(<그림 7.5>, B 및 C 765kV S/S)누설 커패시턴스:
 - CHG(고압권선-대지)= 10[nF]
 - CLG(저압권선-대지)= 8[nF]
 - CTG(3 차권선-대지)= 140[nF]
 - CHL(고압권선-저압권선)= 60[nF]
 - CLT(저압권선-3 차권선)= 40[nF]

(다) <그림 7.6>의 345kV 포함계통인 경우 345kV 축약점에서의 전원임피던스는 각 765kV 모선의 고장전류가 <그림 7.5>의 대상계통과 동일하도록 선정하였다.

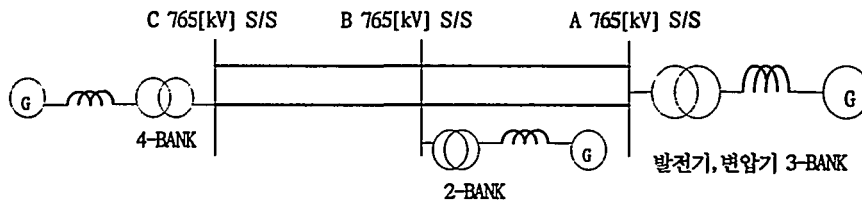


그림 7.5 765kV 해석대상계통

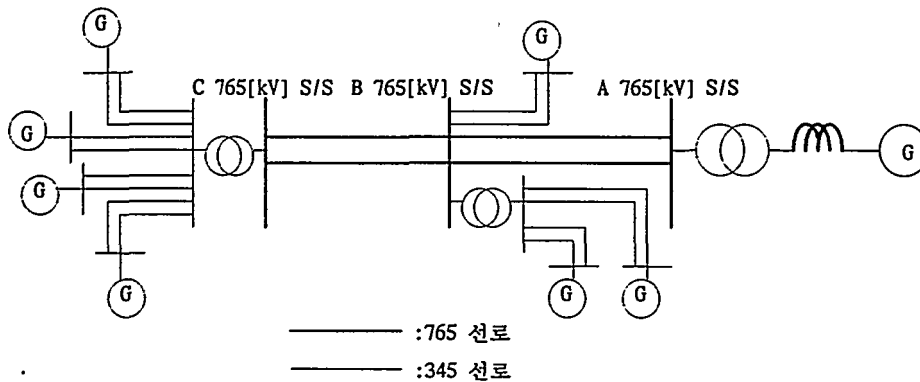


그림 7.6 주변 345kV 포함계통

(5) 해석케이스 및 주대상계통 선정
본 연구에서 검토한 해석케이스는 아래와 같이 분류되어진다.

(가) <그림 7.5>와 <그림 7.6>의 해석대상계통을 비교하기위하여 A 및 B 765kV 3상모선고장시 고유과도회복전압을 비교분석하였다. 그결과 발생 과도회복전압은 양자 상호간 거의 비슷한 결과를 보이므로 주 해석 대상 계통을 <그림 7.5>의 765kV 계통으로 선정하여 3상 및 1상지락 고장시 과도회복전압 검토를 하였다.(<그림 7.12> 참조)

(나) 각 차단기는 전류영점에 도달하는 순서로 차단하므로 첫번째 차단상과 마지막 차단상사이에서 대략 120°의 시간차이가 발생한다. 해석대상계통의 송전선로는 비연가 선로이므로 3상지락고장시 동일 차단기의 차단상 순서에 따라서 결과가 약간 달라질수있다. 그러므로 여기서는 A 및 B 765kV 모선고장시 차단상 순서에 따른 해석결과를 비교해 보았다. 해석결과 큰 차이는 없었다.(<그림 7.13> 참조)

(다) <그림 7.5>의 기본 해석대상 계통에서 A,B,C 변전소의 전원등가임피던스의 크기(기본테이타의 1/3,1/2,1.5배의 경우)와 765/345kV 변압기 운전조건(1/2 Bank 운전)에 따른 결과를 비교검토하였다.(<그림 7.14-7.16> 참조)

(라) 기본 해석대상계통 및 운전상태에 대한 각 모선별 고장위치와 차단기 동작은 아래와 같으며 <그림 7.7>에 나타내었다.

- 모선고장 : 765kV 모선고장시 모선에 연결된 각 차단기는 고장전류 위상에 따라서 순차적으로 차단하며 각 차단기별 과도회복전압 상승률,파고치 및 차단전류를 해석결과에 표시하였다.

- 차단기선로측 고장 : 각 765kV 변전소의 차단기 선로측에서 고장발생 시에는 모선측 고장과 비교하여 차단전류가 훨씬 크며 해당 고장선로

의 양단 차단기만 동작하게 된다.

- 변압기 1차측 고장 : 765kV 변압기의 1차측(765kV 측)에서 고장이 발생한 경우는 위의 차단기 선로측 고장과 거의 동일한 개념이며 765kV 측 차단기가 관심대상이다.
- 변압기 2차측 고장 : 765kV 변압기의 2차측(저압측)에서 고장이 발생한 경우 변압기 자체의 공진주파수 때문에 높은 과도회복전압 상승률을 나타내는것이 일반적이다. 이 경우도 765kV 측 차단기가 관심대상이다.

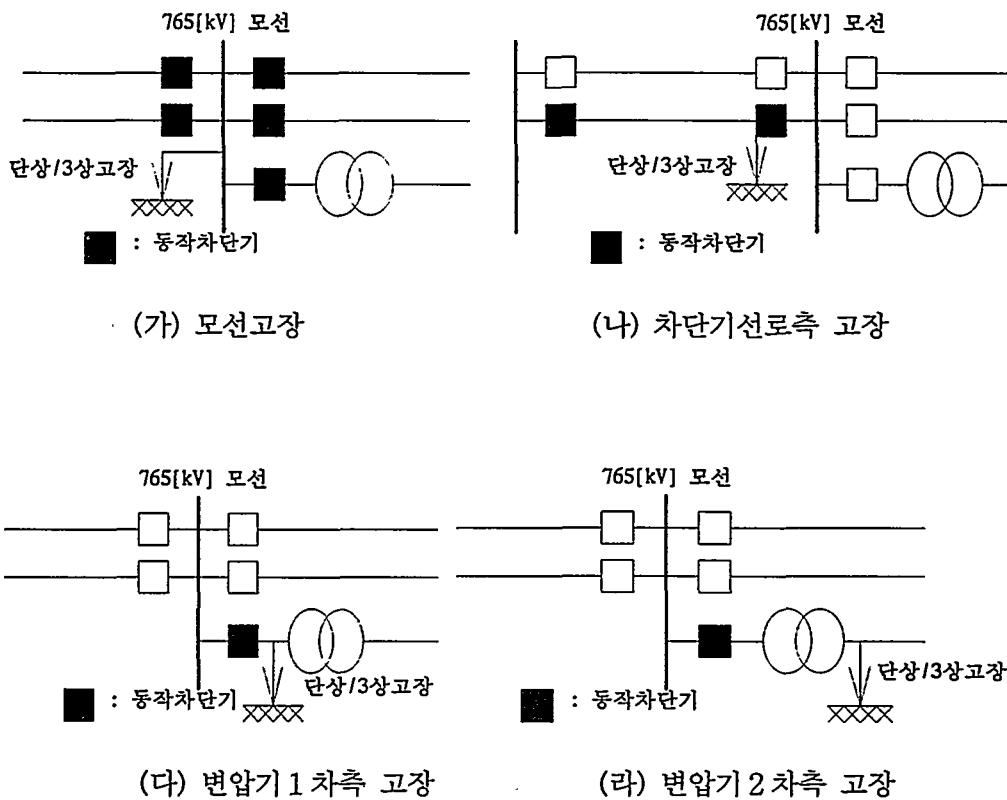


그림 7.7 과도회복전압 해석경우별 고장위치

나. 차단기의 과도회복전압 성능 적용(안)

<그림 78-7.11>은 계통운전조건별 과도회복전압 해석결과를 <그림 7.2>와 같이 차단용량에 대하여 표현한것이다. 그림에서 CB1 및 CB2는 각각 정격전압 800kV 차단용량 40kA와 50kA 차단기의 차단관계곡선을 <표 7.2>의 동작책무별 과도회복전압 규격치를 기준으로하여 나타낸것이다. 전체적인 해석결과와 이를 바탕으로하여 차단기의 과도회복전압 성능 적용(안)을 기술하면 아래와 같다.

(1) 과도회복전압상승률은 모든경우에 있어서 <표 7.2>의 규격치를 만족하고 있다.<그림 78-7.10>의 (나) 참조

(2) 과도회복전압 파고치는 3 상고장시 기본계통에서는 대부분 만족되나(<그림 78 (가)> 참조) 전원동가임피던스가 감소하는경우 <표 7.2>의 규격치를 초과하는 빈도가 증가한다.<그림 7.9 (가)> 참조

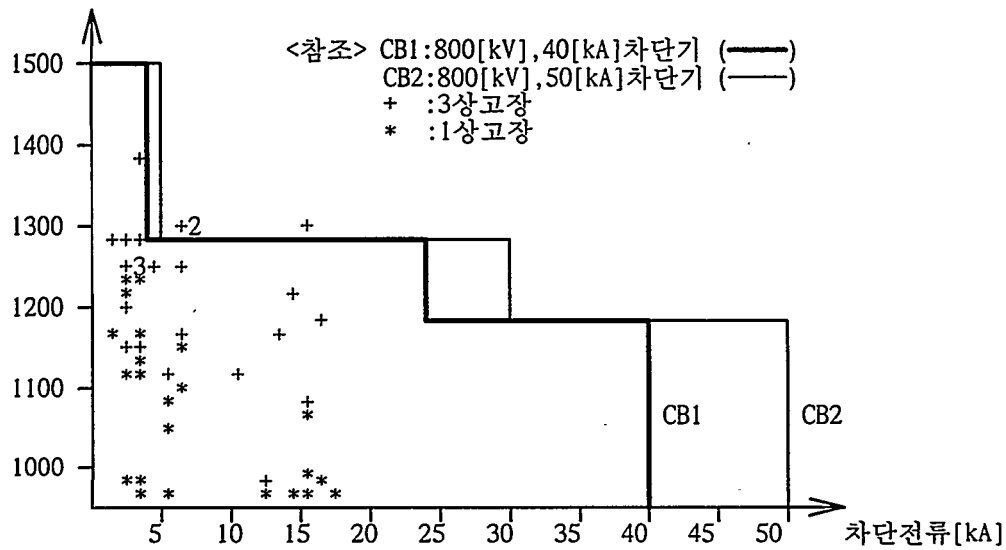
(3) 과도회복전압 파고치가 규격치를 초과하는 (2)항의 경우에도 1 상고장시에 는 모두 <표 7.2>의 규격치를 만족한다.<그림 7.11> 참조

(4) 본 검토를 기초로하여 800kV 급 차단기적용(안)을 수립할때 고려할수 있는 사항을 열거하면 다음과같다.

- IEC-56(1987)규격은 해당계통에서 발생가능한 과도회복전압의 90%를 충족하면 해당규격을 만족하는것으로 보며 나머지 10% 미만의 특수한경우 는 별도검토를 통하여 적정한 차단기를 배치하도록 규정하고있다.
- 본 검토대상인 765kV 변전소는 3 상분리 GIS 변전소이므로 3 상동시고장의 발생확률은 거의 전무하다.
- 본 연구에서 검토한 경우는 가장 가혹한 계통조건을 고려하였으므로 실 계통에서 발생하는 과도회복전압은 해석결과보다는 덜 가혹할것으로 추정된다.

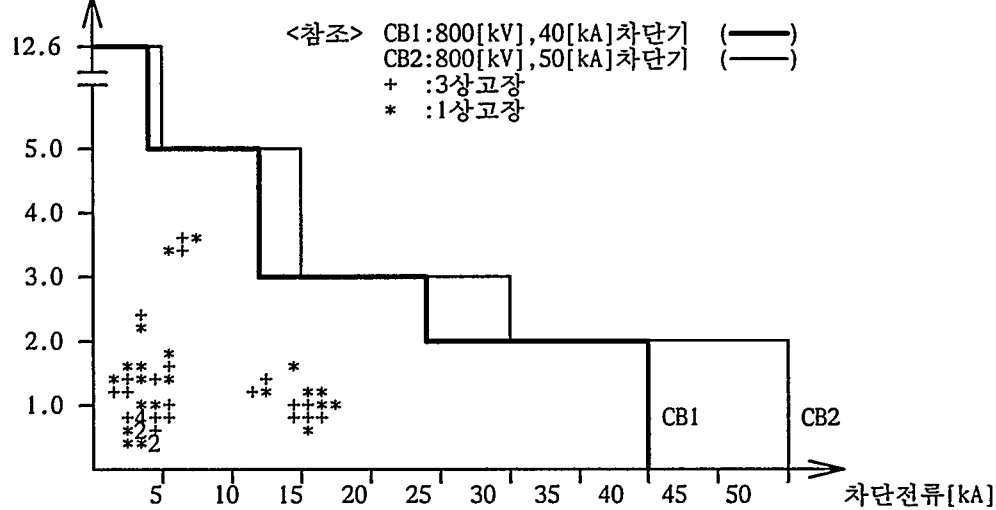
(5) 따라서, <그림 7.5>의 765kV 계통의 고유과도회복전압 특성은 차단용량 40kA 이상의 차단기를 적용하는 경우 IEC-56(1987)규격을 기초로한 <표 7.2>의 기준치를 만족하리라고 예상된다.

TRV파고치[kV]



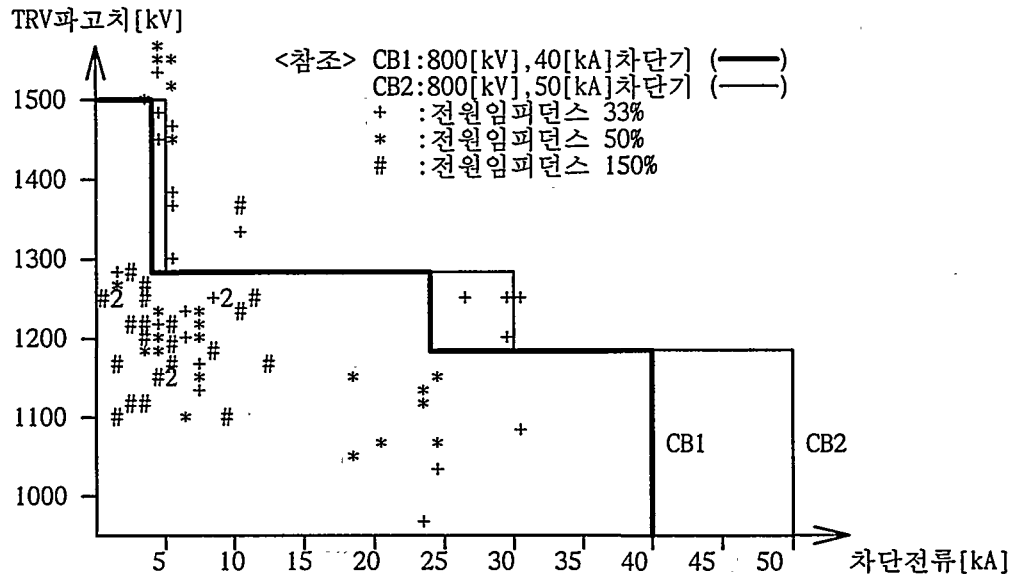
(가) 차단용량별 과도회복전압 파고치(3 상/1 상 고장)

TRV상승률[kV/ μ s]

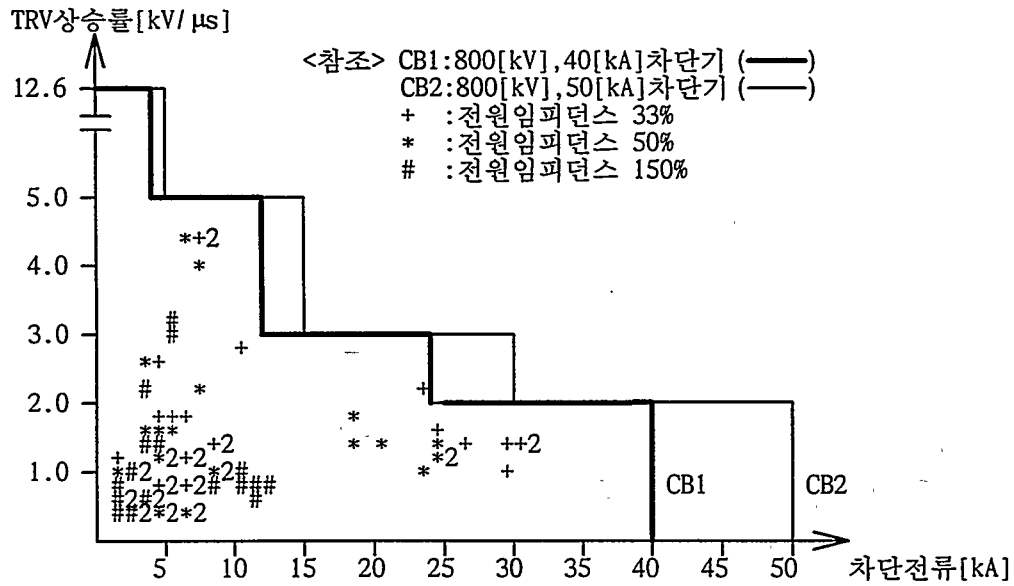


(나) 차단용량별 과도회복전압 상승률(3 상/1 상 고장)

그림 7.8 차단용량과 과도회복전압 특성(기본계통해석)



(가) 차단용량별 과도회복전압 파고치(3 상고장)



(나) 차단용량별 과도회복전압 상승률(3 상고장)

그림 7.9 차단용량과 과도회복전압 특성(전원 등가임피던스변경)

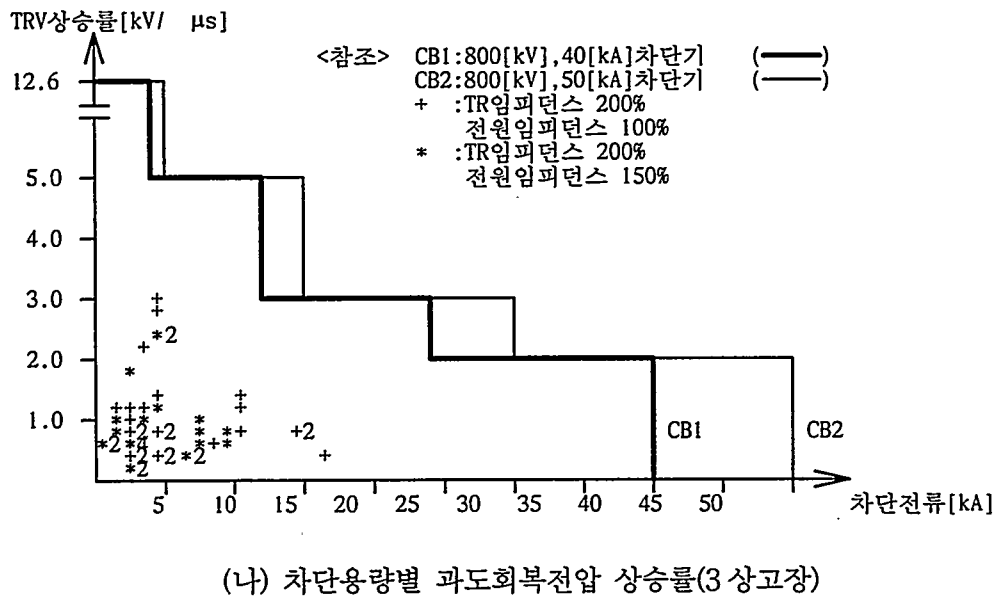
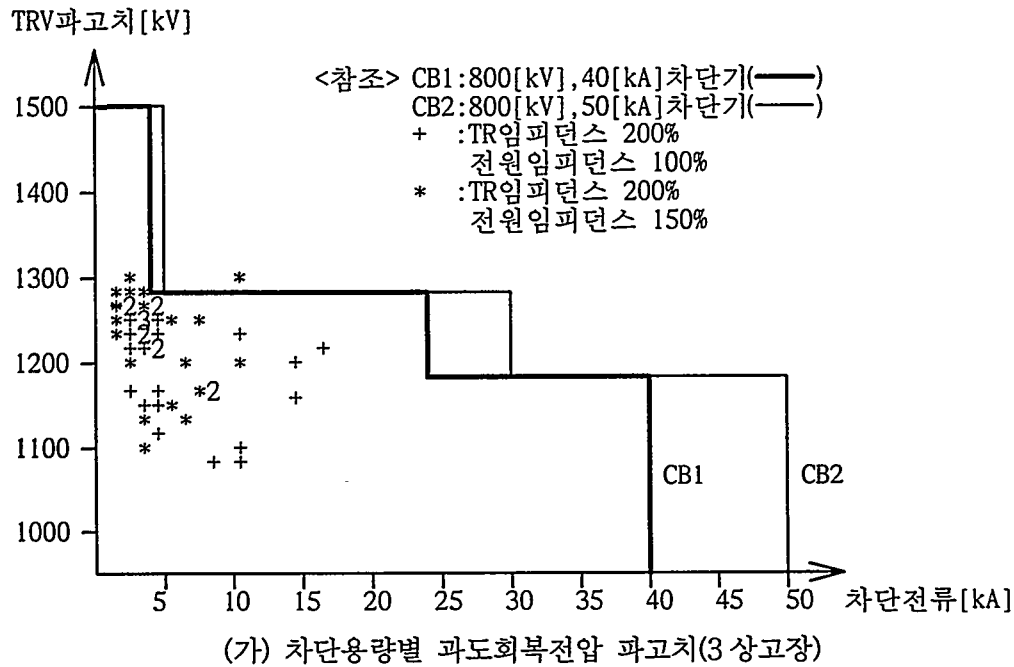


그림 7.10 차단용량과 과도회복전압 특성(TR 및 전원등가임피던스변경)

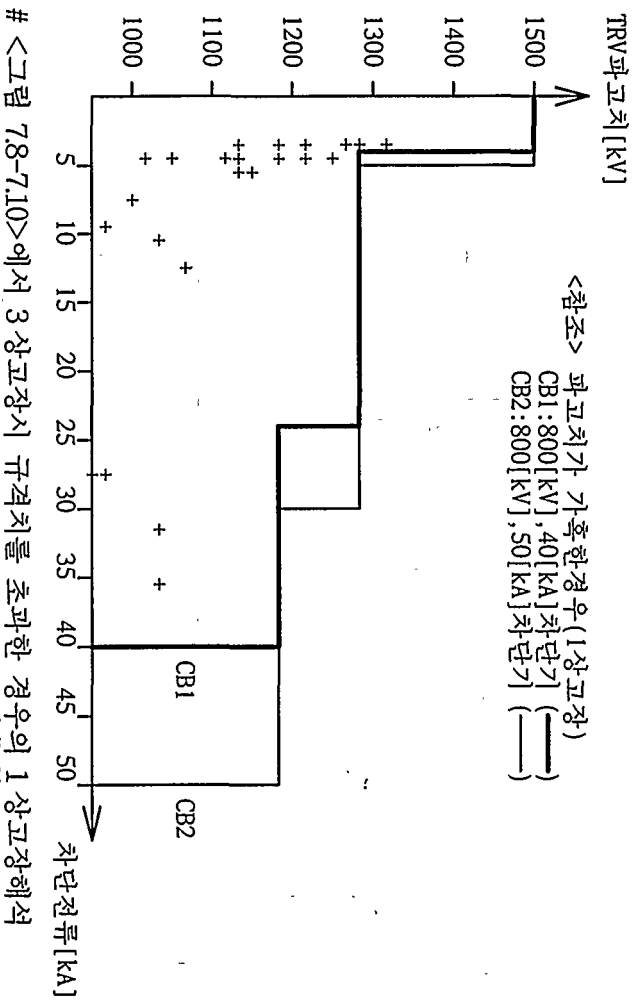


그림 7.11 차단용량과 과도회복전압 특성(1 상고장)

다. 해석결과분석

(1) 결과분석방법

차단기관련 세계표준규격인 IEC-56(1987)은 정격전압 765kV 인 차단기 규정만 있으며 765kV 계통에서 적용될 정격전압 800kV 차단기에 대해서는 아무런 규정이 없다. 그러나 IEC-56(1987)규격의 과도회복전압 관련규정이 123kV 이상의 차단기에 대해서는 동작책무(Duty No 1-5)에 따라서 과도회복전압 상승률이 동일하며 과도회복전압 파고치는 정격전압의 배수로 증가하도록 되어있다. 따라서 본 검토에서는 잠정적으로 해석결과와 IEC 규격파의 비교분석을 위하여 과도회복전압 상승률은 765kV 차단기와 동일한 값을 그리고 파고치는 정격전압의 배수($800/765=1.046$)를 사용하였다. 또한, IEC-56(1987)규격은 차단용량의 비율로써 각각의 동작책무(Duty No. 1-5)를 규정하고 있으나 현재 765kV 계통 차단기의 차단용량이 불명확하므로 정확한 비교분석은 곤란하다. 따라서 본 검토

에서는 정격전압 800kV, 차단용량 40,50kA 차단기를 가정하여 해석결과와 IEC-56(1987) 규격을 비교검토하였다. 비교대상이 되는 각 동작채무별 과도회복전압 상승률과 파고치를 기술하면 <표 7.2>와 같다.

표 7.2 동작채무별 과도회복전압 Parameter

동작채무 NO.	상승률 [kV/μs]	파고치 [kV]	비 고
cm	2.0	1189	
Duty 3 (60%)	3.0	1274	
Duty 2 (30%)	5.0	1274	
Duty 1 (10%)	12.6	1500	
1)과도회복전압 상승률은 IEC-56[1987]의 765kV 차단기와 동일하게 가정			
2)과도회복전압 파고치는 IEC-56[1987]의 765kV 차단기의 배수(800/765)를 가정			
3)Duty 4 & 5 은 DC 분 존재 유·무의 차이			

(2) 해석결과

위에서 기술한 해석 케이스에 대한 고장위치별 해당차단기의 과도회복전압 파형을 분석하여 과도회복전압 초기상승률(kV/μs), 과도회복전압 파고치(kV) 및 차단전류(kA)를 <그림 7.12-7.16>에 나타내었다. 그림에서 나타낸 각종 기호는 다음과 같은 의미를 지니고 있다.

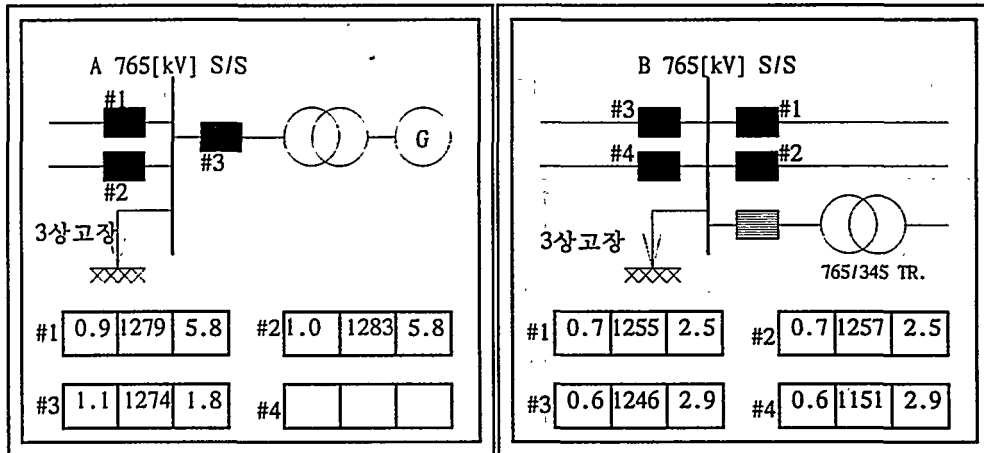
- ☐ : 그림에 나타낸 고장위치에서 고장발생시 후비보호용으로는 동작하지만 순시차단은 하지않는 차단기이다. 따라서 본 해석시 과도회복전압검토대상 차단기는 아니다.

표 7.3 계통운전조건 및 고장종류

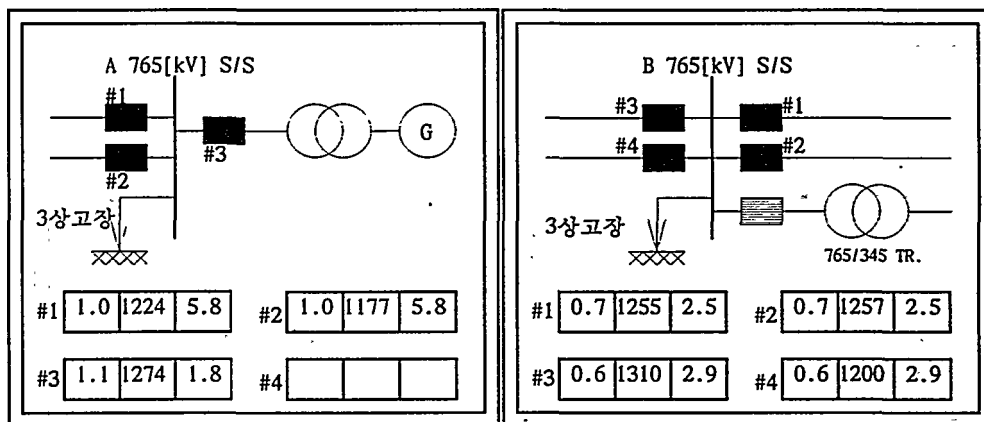
M	전원등가 임피던스 (%)*1)	765/345 TR 운전 (%)*2)	고장종류
1	100	100	3 상지락
2	100	100	1 상지락
3	33	100	3 상지락
4	50	100	3 상지락
5	150	100	3 상지락
6	100	50	3 상지락
7	150	50	3 상지락
8	*3)	*3)	1 상지락
*1) <그림 7.5>에서 기본계통해석시(<그림 7.8>)의 전원등가임피던스 와 A S/S의 Step-up TR.(3-Bank운전)이 100% *2) <그림 7.5>에서 B(2-Bank운전)와 C(4-Bank운전)765 S/S 운전조 건이 100% *3) 3 상고장시에 과도회복전압 과고치가 <표 7.2>의 규격치를 초과하 는 경우의 1 상고장			

-  : 고장발생시 순시차단은 하나 검토대상은 아닌 차단기로서 765kV 모
선고장시 765/345kV 변압기측 차단기가 이에 해당된다. 이러한 차단기의
경우 <그림 7.5>의 대상계통에서 발생하는 과도회복전압이 전원단이 인접
하고 변압기 커패시턴스의 영향때문에 실제와 다르며, 실제 발생하는 과도

회복전압은 선로측 차단기보다 낮다. 따라서 검토대상에서 제외했다.



(A) 765kV 축약계통해석(<그림 7.5>)



(B) 주변 345kV 포함계통(<그림 7.6>)

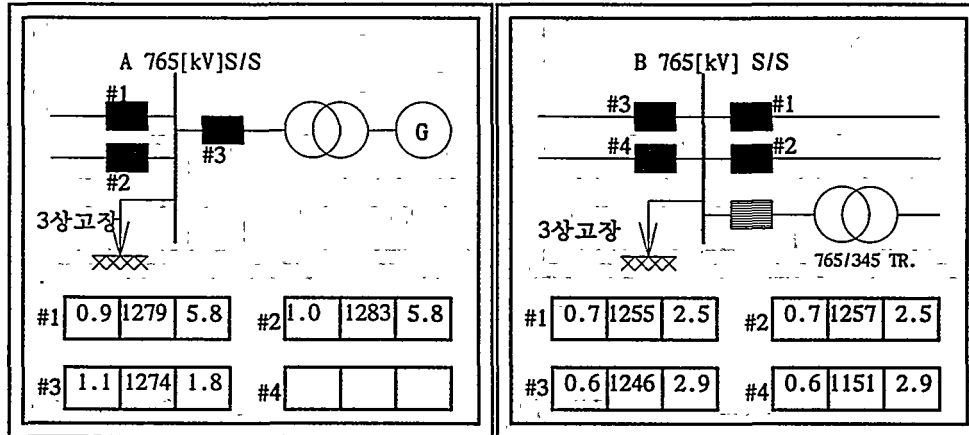
그림 7.12 해석대상계통별 TRV 결과 비교

- ■ : 고장발생시 순시차단을 하며 아래와 같은 과도회복전압이 발생하는 차단기
- #N-M [A] [B] [C] : ■ 표시 차단기의 과도회복전압 해석결과

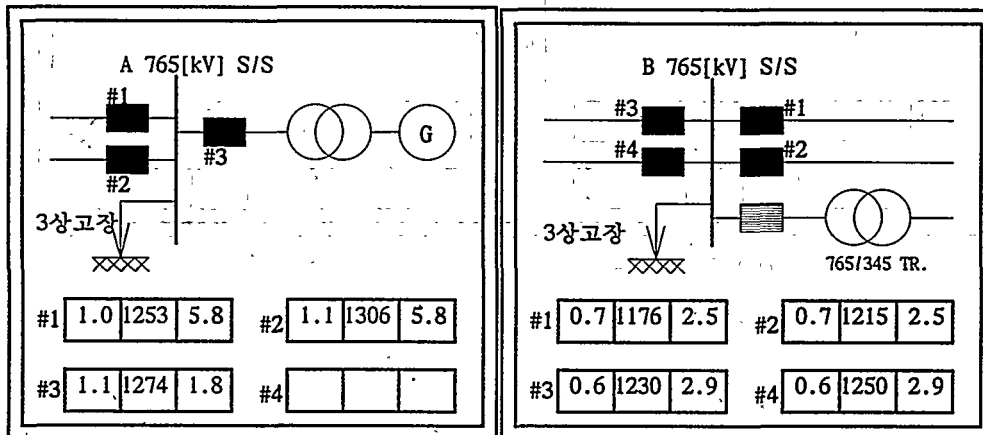
(A:상승률(kV/μs), B:파고치(kV), C:차단전류(kArms)를 의미

#N(1-4):그림에 나타낸 #N 차단기를 표현)

-M(1-7):<표 7.3>과 같은 계통운전조건 및 고장종류를 의미한다.



(A) A,B,C : $\angle 0^\circ, \angle -120^\circ, \angle 120^\circ$



(B) A,B,C : $\angle -120^\circ, \angle 120^\circ, \angle 0^\circ$

그림 7.13 차단 Sequence 에 따른 해석결과 비교

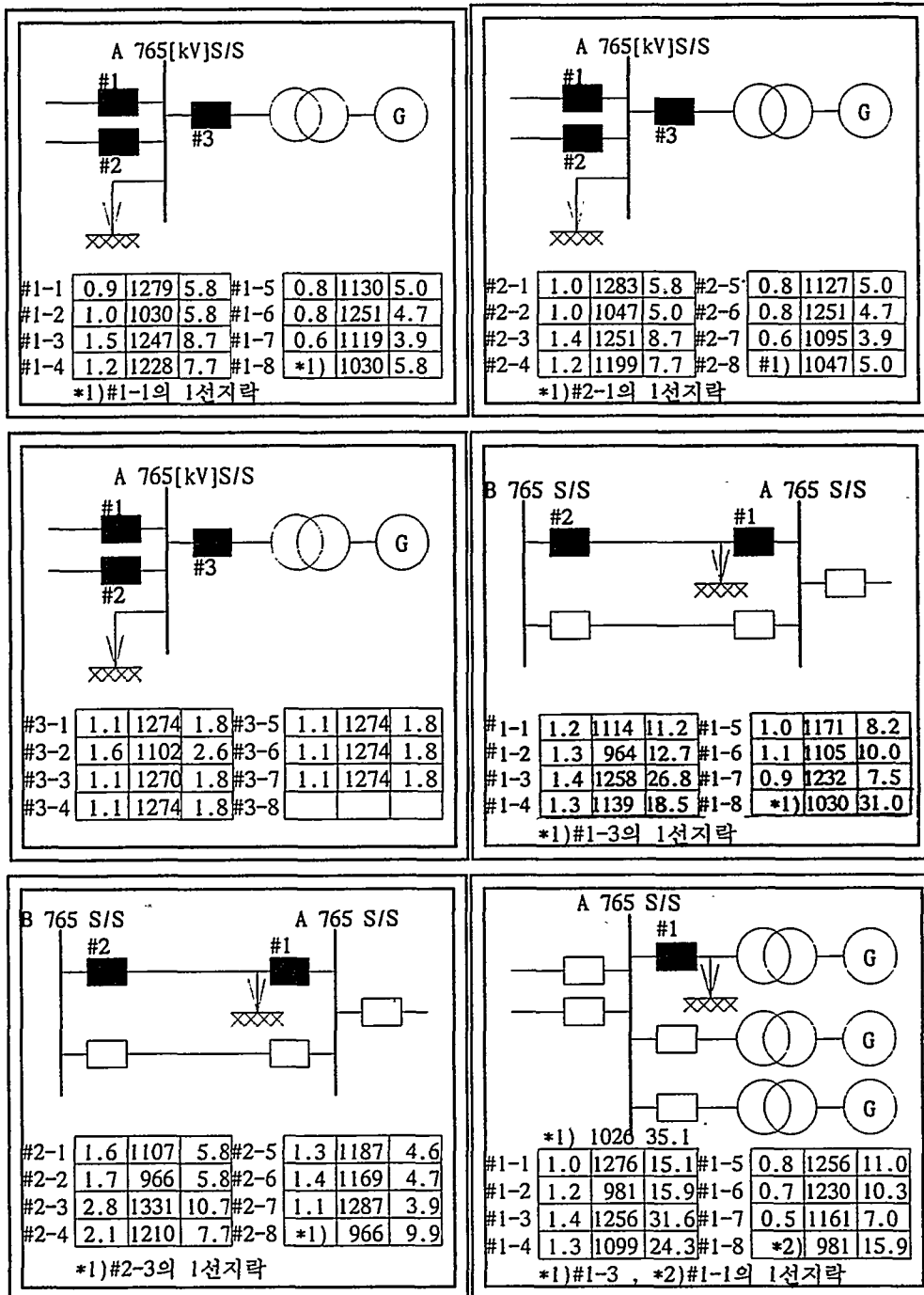


그림 7.14 765kV A 변전소 TRV 해석결과(계속)

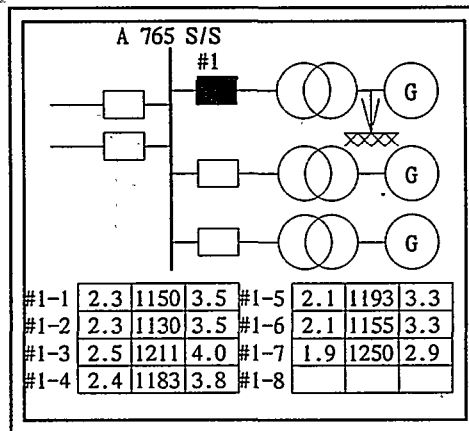


그림 7.14 765kV A 변전소 TRV 해석결과

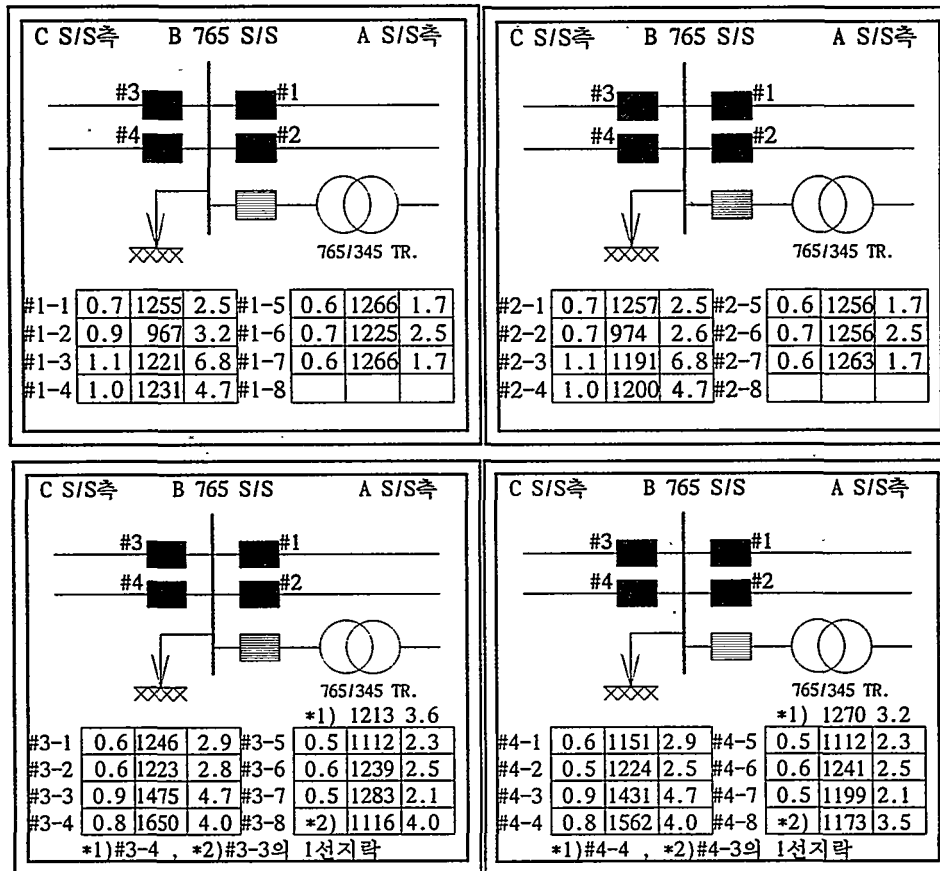


그림 7.15 765kV B 변전소 TRV 해석결과(계속)

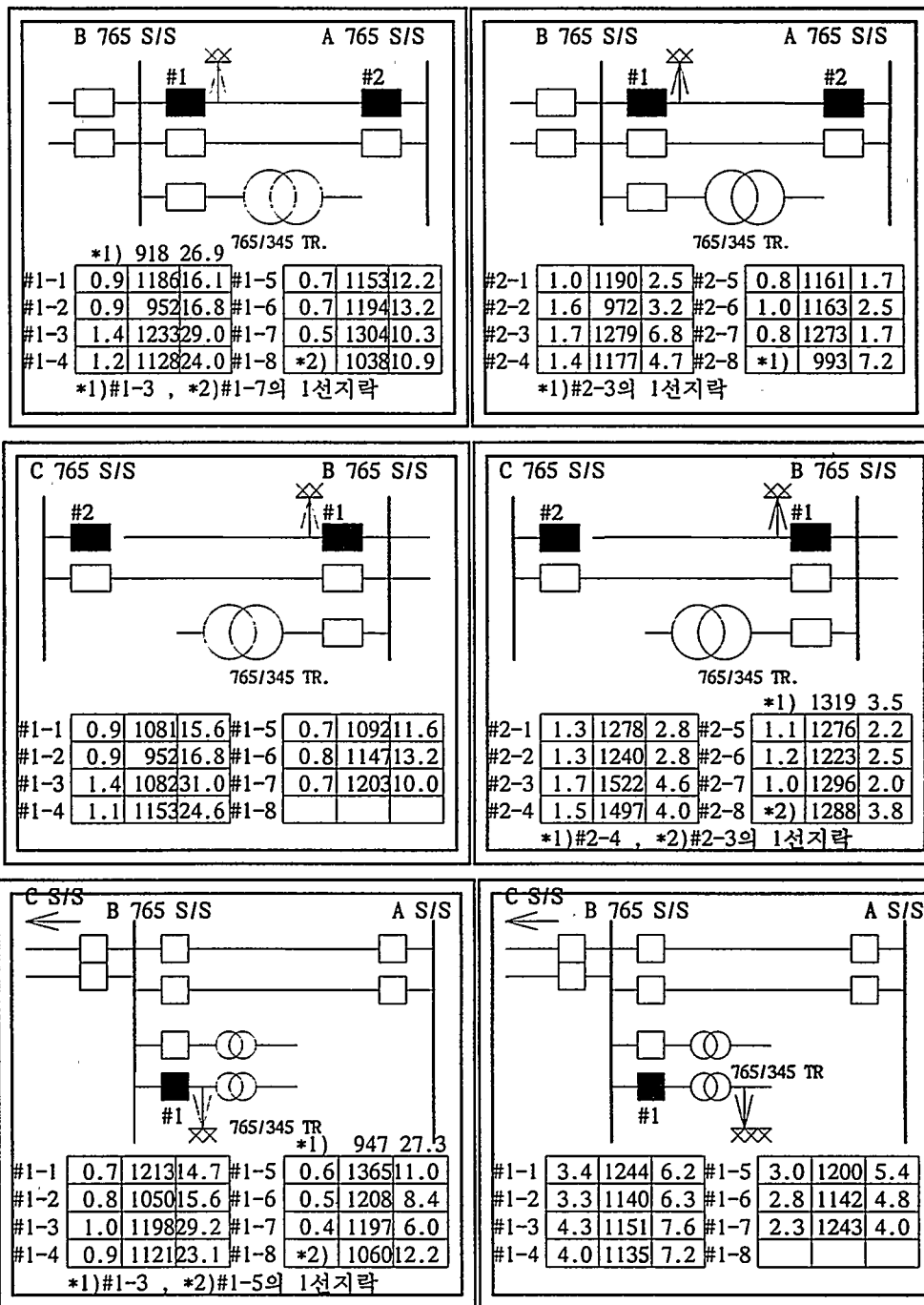


그림 7.15 765kV B 변전소 TRV 해석결과

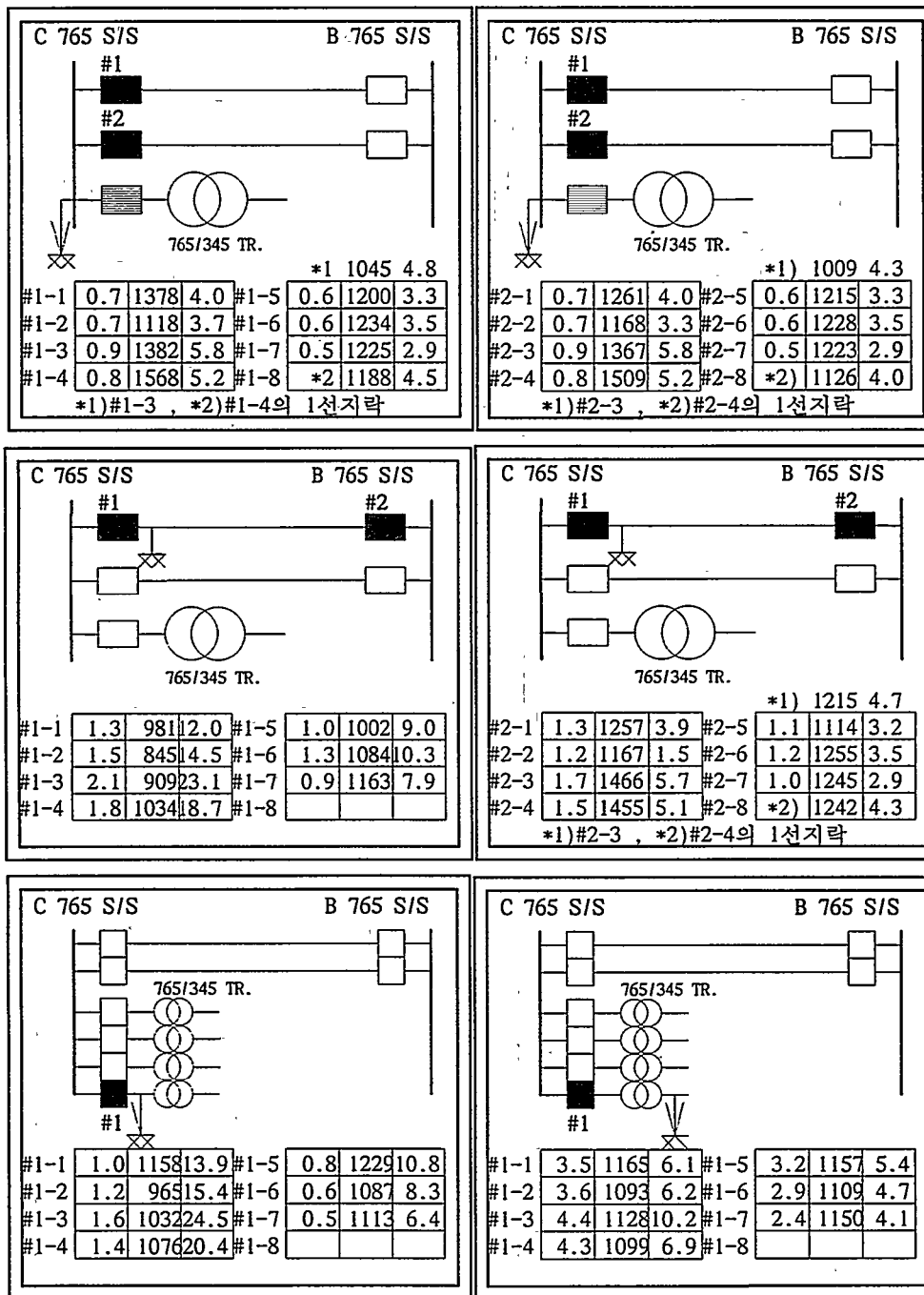


그림 7.16 765kV C 변전소 TRV 해석결과

제 2 절 765kV 송전계통의 고속접지개폐기

송전선로에 아크 지락고장이 발생하여 차단기에 의해 고장선로가 계통으로부터 분리되면 적정시간내에 아크가 소멸되므로, 차단기 재투입에 의해 계속적으로 송전할 수 있다.

그런데 계통전압이 높아지고 다상 또는 단상 재폐로 방식이 적용되는 계통에서는, 아크 지락고장이 발생하여 차단기에 의해 고장선로가 분리되어도 타상 및 타회선(2 회선 선로일 경우)으로부터의 정전유도에 의한 아크(2 차 아크)가 적정시간내에 소멸되지 않음으로 인해 원치않는 재투입 실패가 발생할 수도 있다.

국내 765kV 계획 계통에서는 2 회선 송전선로를 사용하고, 고장에 의한 계통 분리를 가능한 줄이기 위해 다상 재폐로 방식에 대해 적극적으로 검토하고 있으므로, 2 차 아크에 의해 재폐로 시간이 계통 안정도를 위협하는 수준 이상으로 길어질 가능성이 있다.

따라서 국내 765kV 계획 계통에서는 효과적으로 짧은 시간 내에 2 차 아크를 소멸시킬 수 있는 고속접지개폐기(High Speed Grounding Switch, HSGS)의 적용을 긍정적으로 검토하고 있으므로, 여기에서는 고속접지개폐기의 기본적인 요구 특성인 차단전류와 과도회복전압에 대해 검토한 내용을 기술하였다.

1. 고속접지개폐기의 동작 흐름도

<표 7.4>에 고속접지개폐기 적용시의 재폐로 순서를 도시하였다.

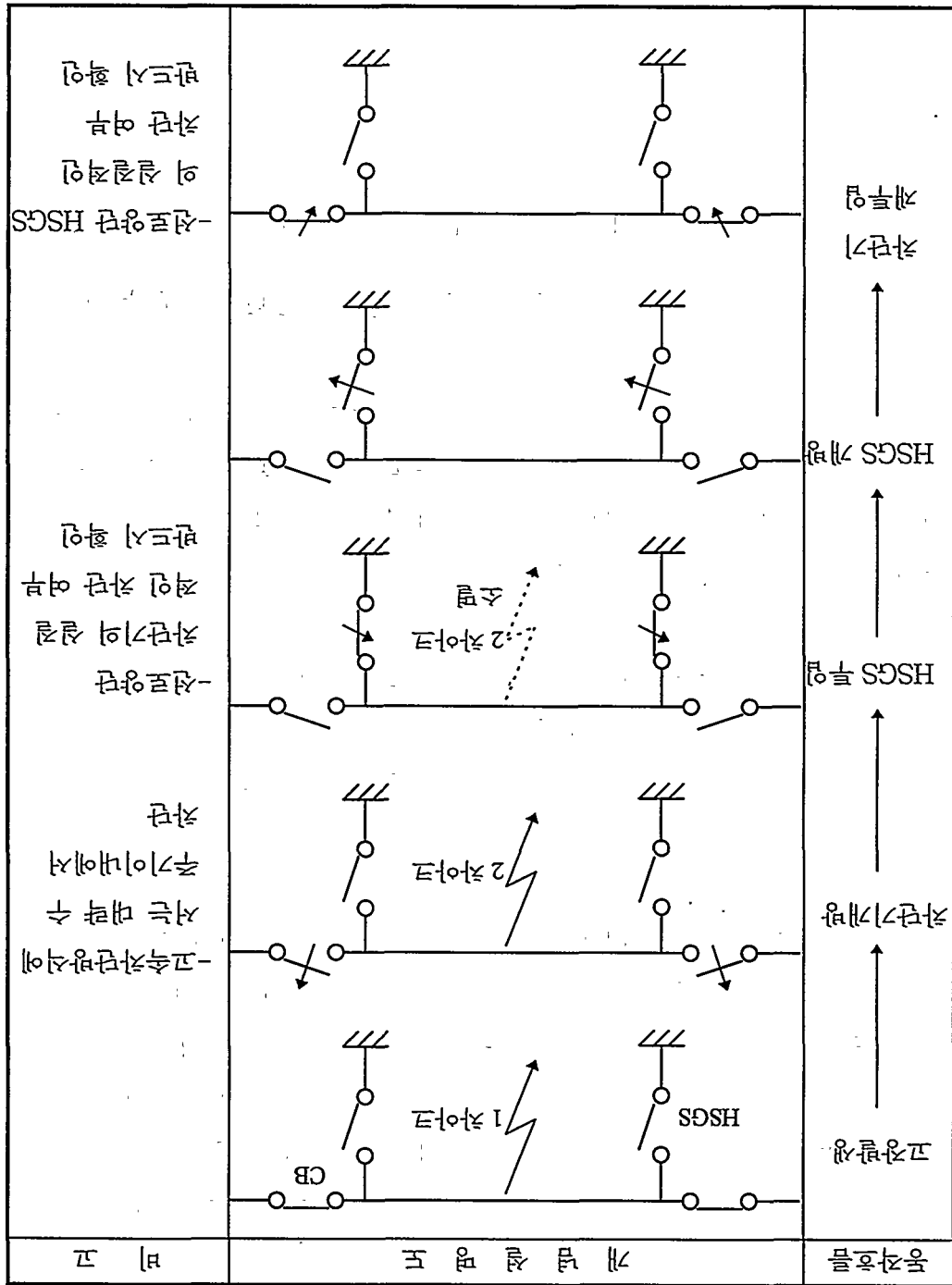


표 74 고속점지개폐기 적용시 재폐로 흐름

2. 해석 조건

고속접지개폐기의 주요성능을 결정하기 위해서는, 건전상 및 건전회선으로부터의 유도에 의한 전류의 크기 및 유도전류 차단시 고속접지개폐기의 양극간에 발생하는 과도회복전압의 특성을 반드시 검토하여야 한다.

특히, 고속접지개폐기의 동작실패는 선로의 영구사고로 직결되어 장기간 정전사고를 유발하게 되므로, 발생빈도가 희박한 경우까지도 고려하여 검토하는 것이 바람직하다. 따라서 여기에서는 고속접지개폐기 동작중에 타상 및 타회선에 후속 고장이 발생하는 경우를 포함하여 검토하였다.

고속접지개폐기의 동작특성을 해석하기 위한 대상 계통은 <그림 7.17>에 나타낸 것과 같이 2모선 계통만을 상정하였다. 고속접지개폐기의 동작시점이 대상선로 양단의 차단기가 개방된 시점 이후이고, 타상 및 타회선의 전류, 전압 및 조건 만이 고속접지개폐기의 동작에 영향을 끼치게 되므로, 2모선 계통만을 대상계통으로 상정하여도 가능한 모든 조건들을 모의할 수 있다.

전원 임피던스는 단락용량에 따른 등가 임피던스로부터 상정하여 모의하였는데, 모선에서의 단락전류 10 ~ 50 [kA] 범위의 여러 조건들을 조합하여 상정하였으며, 정상상태에서의 조류는 3 ~ 6 [GW] 범위에 대해 검토하였다. 또한 선로길이는 30 ~ 200 [km] 범위에 대해 검토하였다.

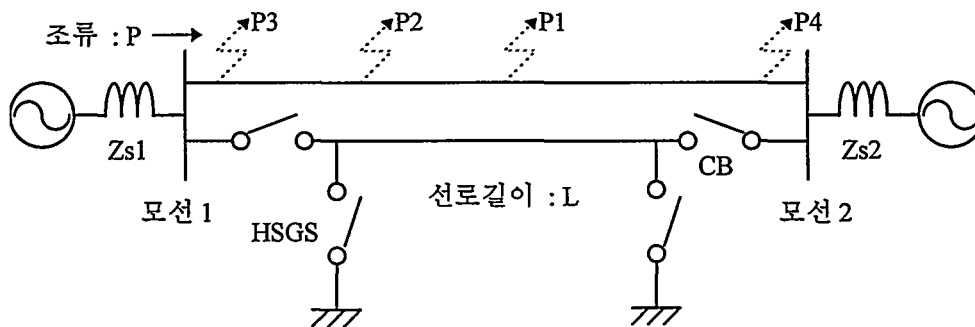


그림 7.17 고속접지개폐기 동작특성 검토용 모델 계통

3. 고속접지개폐기의 차단전류 및 과도회복전압(안)

<표 7.5>에 국내 765kV 송전 선로에 적용할 고속접지개폐기의 동작요구특성(안)을 나타내었다.

표 7.5 고속접지개폐기의 요구특성(안)

항 목		특 성 값(안)	비 고
차 단 전 류 [kA _{rms}]		8	- HSGS 동작중 후속
과도회복 전압	상승률 [kV/μs]	1.30	1 선지락고장까지 상정
	과고치 [kV]	600	- 선로길이 : 30 ~ 200 [km]

4. 고속접지개폐기의 차단전류 및 과도회복전압 발생 양상

가. 고속접지개폐기의 차단전류

고속접지개폐기가 차단하는 전류는 선로 양단의 고속접지개폐기가 동시에 차단되지 않기 때문에, 먼저 차단하는 고속접지개폐기는 타상 및 타회선으로부터의 전자유도전류를 차단하게 되며, 뒤에 차단하는 고속접지개폐기는 타상 및 타회선으로부터의 정전유도전류를 차단하게 된다.

정전유도에 의해 고장상(고속접지개폐기가 동작하고 있는 상)에 흐르는 전류는, 전자유도에 의해 고장상에 흐르는 전류에 비해 매우 작으므로, 여기에서는 전자유도에 의한 고속접지개폐기의 차단전류에 대해 검토하였다.

또한 고속접지개폐기의 차단 실패는 해당회선의 영구사고로 직결되므로 매우 가혹한 복합 사고(다상사고 및 후속사고를 포함하는 사고) 조건도 함께 상정하여 검토하였다.

(1) 단순 사고시의 차단전류

고속접지개폐기가 동작중에 타상 및 타회선에 추가의 사고가 없는 경우를 단순 사고로 표현하였으며, 대상 계전 방식을 대상 재폐로 방식으로 가정하여 재폐로가 가능한 모든 경우의 다상 사고를 포함하여 검토한 결과는 다음과 같다.

다상 재폐로 방식에서는 최대 4상 사고까지 재폐로가 가능한데, 단순사고시에 고속접지개폐기에 유도되는 전류는 부하전류에 기인하는 성분이 되므로 <그림 7.18>에 나타낸 것과 같이 조류에 거의 비례하는 유도전류가 흐르게 된다. <그림 7.19>에는 선로길이에 따른 변화를 도시하였다.

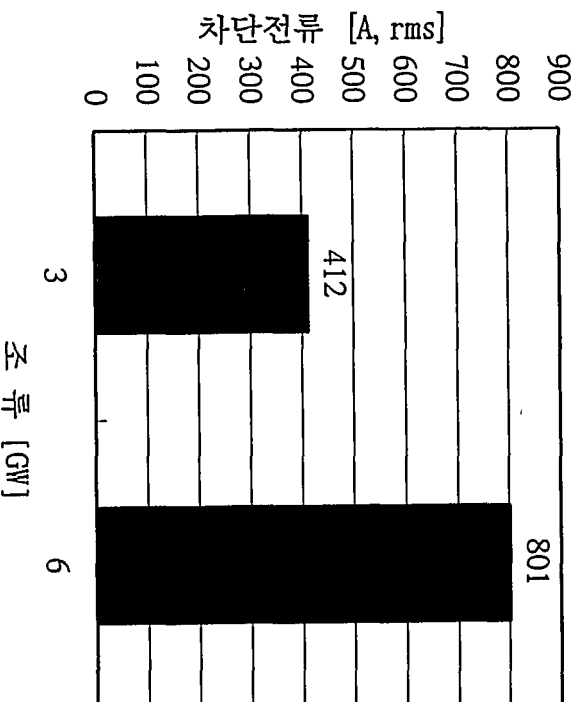


그림 7.18 단순 사고시 조류에 따른 고속접지개폐기의 차단전류

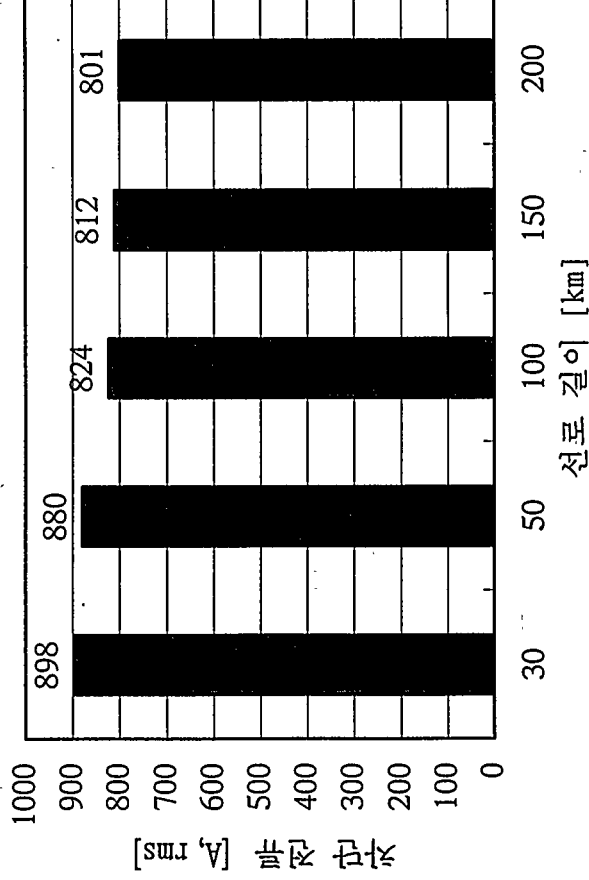


그림 7.19 단순 사고시 선로 길이에 따른 고속접지개폐기의 차단전류

(2) 복합 사고시의 차단전류

어떤 고속접지개폐기가 동작중에 타상 또는 타회선에 추가의 사고가 발생하는 경우를 복합 사고로 표현하였으며, 이러한 형태의 사고는 다중 뇌격이 계통에 침입하여 발생할 수 있다. 여기에서는 발생 가능성 및 빈도를 고려하여 1선지락에 의해 1 상의 고속접지개폐기가 동작중에 타상 또는 타회선에 추가의 1 선지락사고가 발생한 경우까지 상정하여 검토하였다.

<그림 7.20>에 후속 고장 위치에 따른 차단전류 변화를 도시하였는데, 유도전류의 방향성에 의해 모선 부근 즉, 선로 말단 가까이에 후속 고장이 발생한 경우의 차단전류가 선로 중앙 부근에 발생한 경우보다 큰 값으로 나타났다.(고장 위치는 <그림 7.17> 참조)

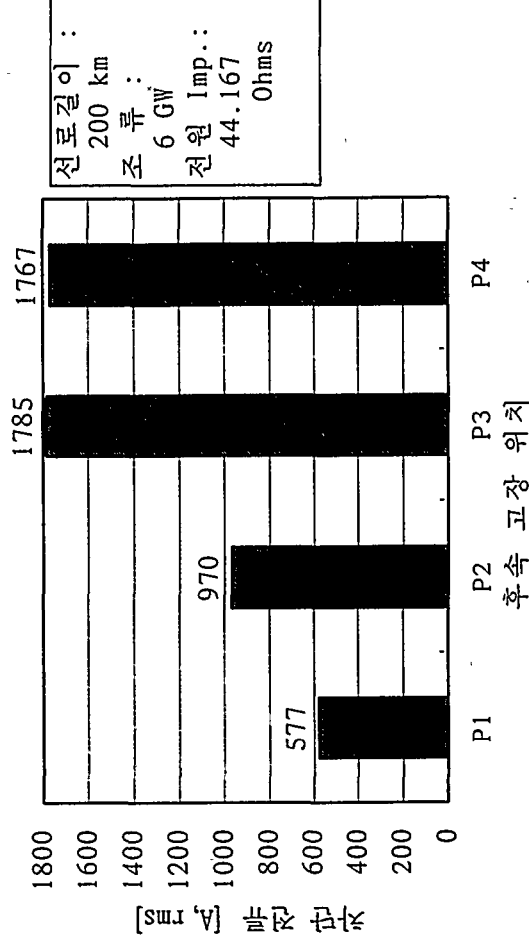


그림 7.20 후속고장위치에 따른 고속접지개폐기의 차단전류

<그림 7.21>에 등가 전원 임피이던스 변화에 따른 고속접지개폐기의 차단 전류에 대해 도시하였는데, 등가 전원 임피이던스는 해당 모선에서의 3상단락 고장시 등가 전원으로부터의 유입 고장전류의 변화로 표시하였으며, 이 때 유입 고장전류는 10 ~ 40 [kA] 까지 상정하였다. 후속고장위치는 모선 2 부근으로 두었는데, 모선 1 쪽의 등가 전원 임피이던스가 작아지면(즉, 전원 1 쪽에 서의 유입고장전류가 커지면) 선로를 통과하는 고장전류가 커지게 되고, 이에 의한 고속접지개폐기가 동작중인 선로의 전자유도전류도 커지게 되어 고속접지개폐기의 차단전류도 커지게 됨을 알 수 있다.

한편 <그림 7.22>에 선로 길이에 따른 고속접지개폐기의 차단전류 변화를 도시하였다. 후속 고장시의 고속접지개폐기 차단전류는 선로길이에 대략 반비례하는 경향을 보이고 있으나, <표 7.6>에 나타난 선로길이 변화에 대한 고장 전류 변화와 함께 검토하면, 고속접지개폐기의 차단전류는 실질적으로 고장전류에 직접적인 영향을 받는 것을 알 수 있다.

참고적으로 <표 7.7>에 고장저항을 고려한 경우의 해석결과를 도시하였다.

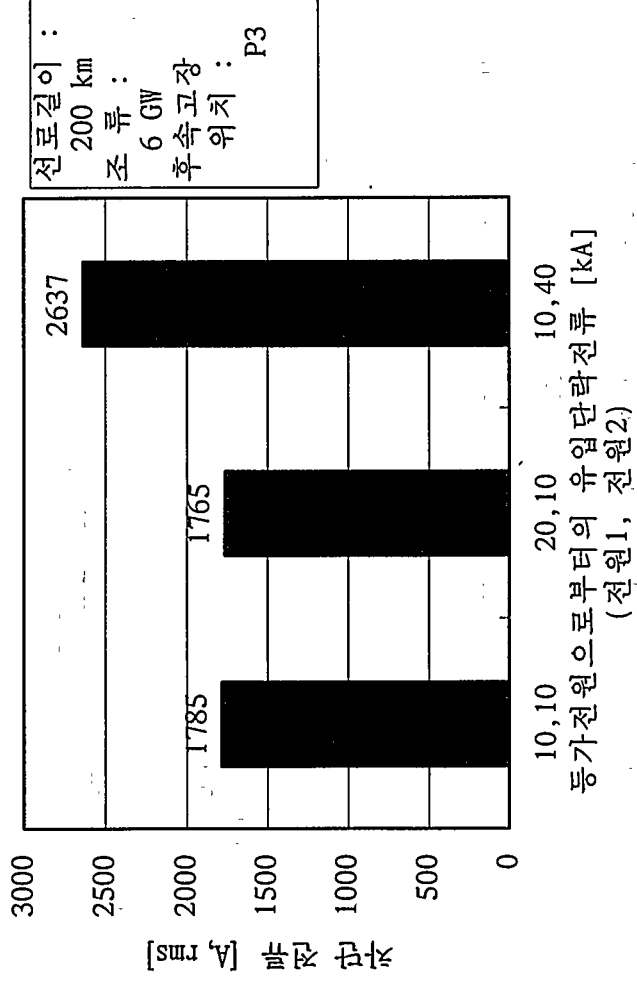


그림 7.21 등가전원 임피던스에 따른 고속점지개폐기의 차단전류

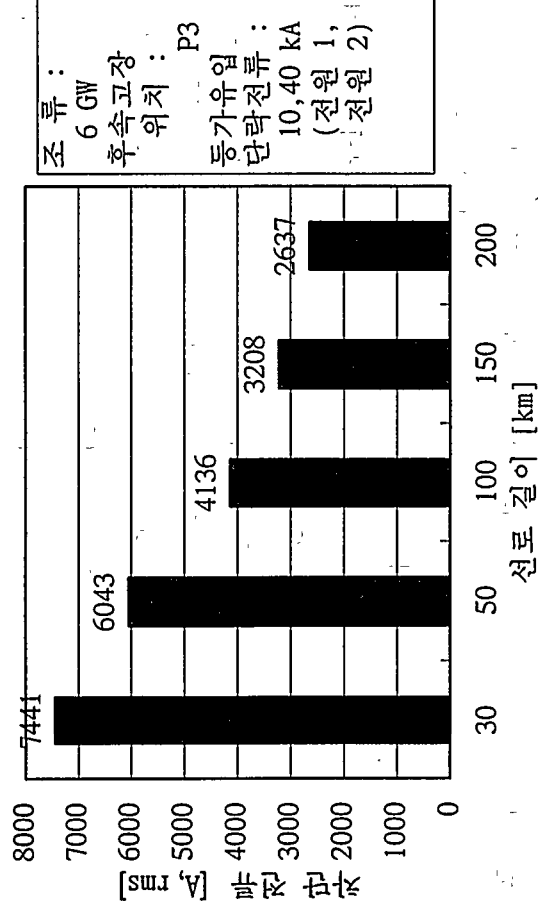


그림 7.22 선로 길이에 따른 고속점지개폐기의 차단전류

표 7.6 선로길이변화에 따른 고장전류 변화

(고장위치 P3, HSGS 동작상 C1, 후속고장상 B2, 고장저항 0)

선로길이 [km]	30	50	100	150	200
고장전류 [A]	27,005	23,312	18,243	15,713	14,142
모선 2->고장점	9,835	8,086	5,600	4,369	3,573

표 7.7 고장저항에 따른 고장전류 및 고속절지개폐기 차단전류
(<표 7.6>의 경우에서 30 km 일 때를 기준)

고장저항[ohms]	0	1	5	10
고장전류 [A]	27,005	26,932	25,726	22,904
모선 2->고장점	9,835	9,670	8,712	7,176
HSGS 전류 [A]	7,441	7,398	6,981	6,121

나. 고속절지개폐기의 과도회복전압

정상 과도회복전압이라 함은 차단기에 의해 고장전류 차단시에 차단기 양극간에 발생하는 과도전압을 칭하는 것인데, 여기에서는 고속절지개폐기가 타상 및 터회선으로부터 유도되는 전류를 차단할 때 발생하는 고속절지개폐기 양극간의 과도전압을 고속절지개폐기의 과도회복전압이라 칭하고, 일반 차단기의 경우에 준해서 상승률 및 파고치 요소로 분석 검토하였다.

또한 고속절지개폐기의 과도회복전압 특성은 발생 켜여지 전압의 투반사 현상이 단일 선로의 양단으로 국한되므로 매우 단순한 형태를 가지게 된다. 따라서 파형 표시방법으로는 IEC 규격에서 정의하고 있는 2-Parameter 법으로 표현하여도 충분하므로, 여기에서는 국내 765kV 송전선로용 고속절지개폐기에 발생하는 과도회복전압 특성을 단일 상승률과 파고치만으로 표현하였다.

(1) 과도회복전압의 파고치

(가) 단순 사고시 과도회복전압 파고치

<그림 7.23>에 후속 고장이 발생하지 않은 단순 사고시 사고상수에 따른 과도회복전압 파고치 변화를 도시하였으며, 단상 고장시 발생되는 과도회복전압보다 다상 고장시의 과도회복전압이 높게 나타났다. <그림 7.18>에 도시한 사고 상수에 따른 고속접기개폐기의 차단전류에 대해 검토한 결과와 비교하면, 단상 고장시보다 다상 고장시에 차단전류가 커지고, 차단전류가 커지면 과도회복전압 파고치도 상승하는 양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

<그림 7.24>에 단순 사고시 선로 길이에 따른 과도회복전압 파고치 변화를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 선로 길이가 길어지면 파고치도 상승하는 양상을 보이고 있는데, 이는 선로 길이가 길어지면 반대편에서의 부변사가 되 돌아 오는 지점이 늦어지기 때문일 것으로 사료된다.

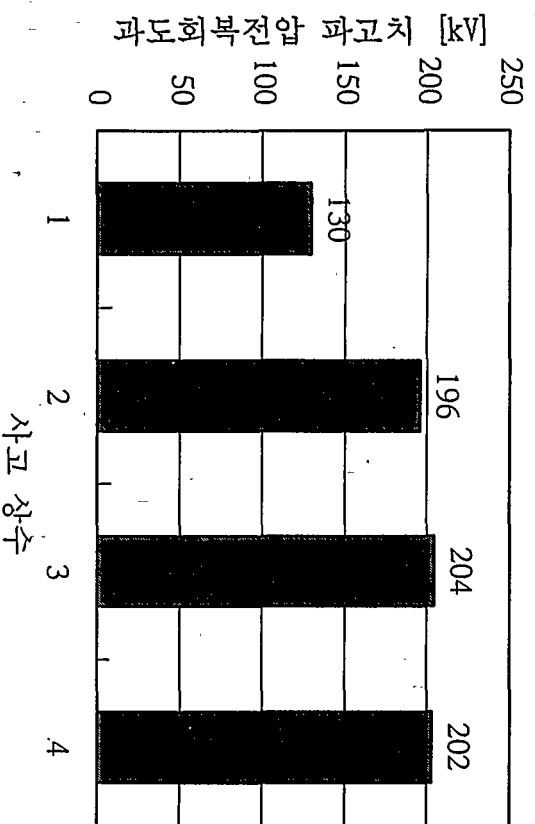


그림 7.23 단순 사고시 사고 상수에 따른 과도회복전압 파고치

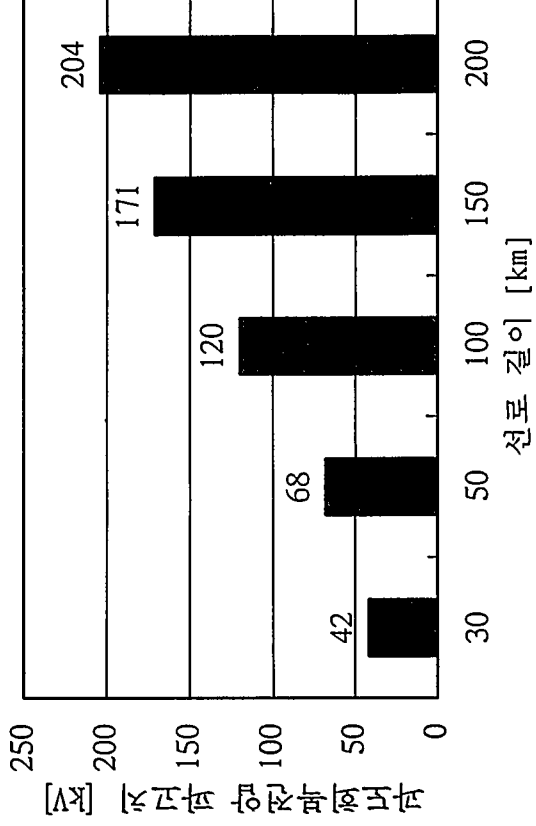


그림 7.24 단순 사고시 선로 길이에 따른 과도회복전압 파고치

(나) 복합 사고시 과도회복전압 파고치

<그림 7.25>에 고속절지개폐기 동작직전에 타상 또는 타회선에 후속고장이 발생한 경우에, 후속 고장 발생위치에 따른 과도회복전압 파고치 변화를 도시하였는데, 선로 중앙부보다 선로 양단 부근에 후속고장 발생시의 과도회복전압 파고치가 높아지는 경향을 보이고 있다.

<그림 7.26>에는 복합 사고시 등가 전원 임피던스에 따른 과도회복전압 파고치 변화를 도시하였는데, 후속고장상에 선로를 통해 큰 고장전류가 흐르게 되면 고속절지개폐기가 동작되는 상으로 유도되는 전류도 커지게 되어, 큰 전류를 차단하는 고속절지개폐기에 발생하는 과도회복전압 파고치도 상승하게 됨을 알 수 있다.

또한 <그림 7.27>에는 후속고장이 있을 때 선로 길이 변화에 따른 고속절지개폐기의 과도회복전압 파고치를 나타내었는데, 단순 사고시와 마찬가지로 선로가 길어지면 파고치도 상승하는 경향을 보이고 있다.

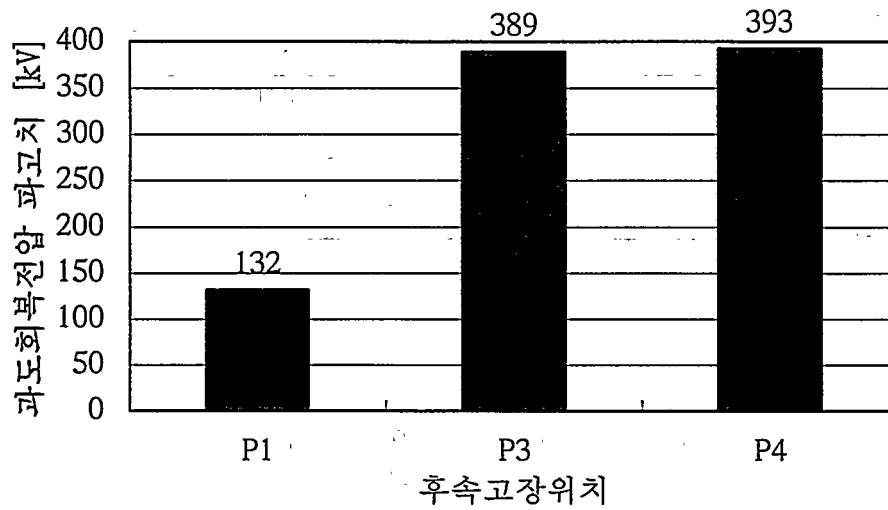


그림 7.25 후속고장위치에 따른 과도회복전압 파고치

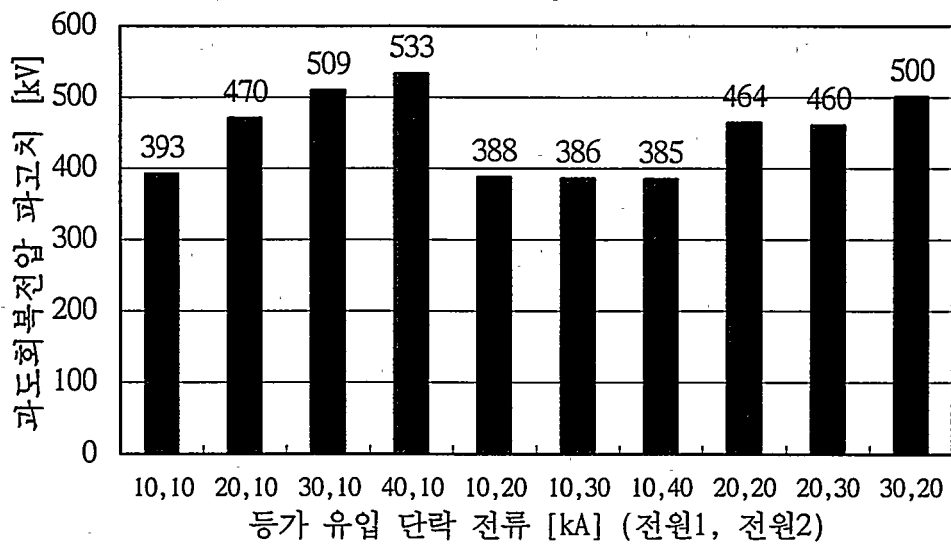


그림 7.26 등가 전원 임피이던스에 따른 과도회복전압 파고치

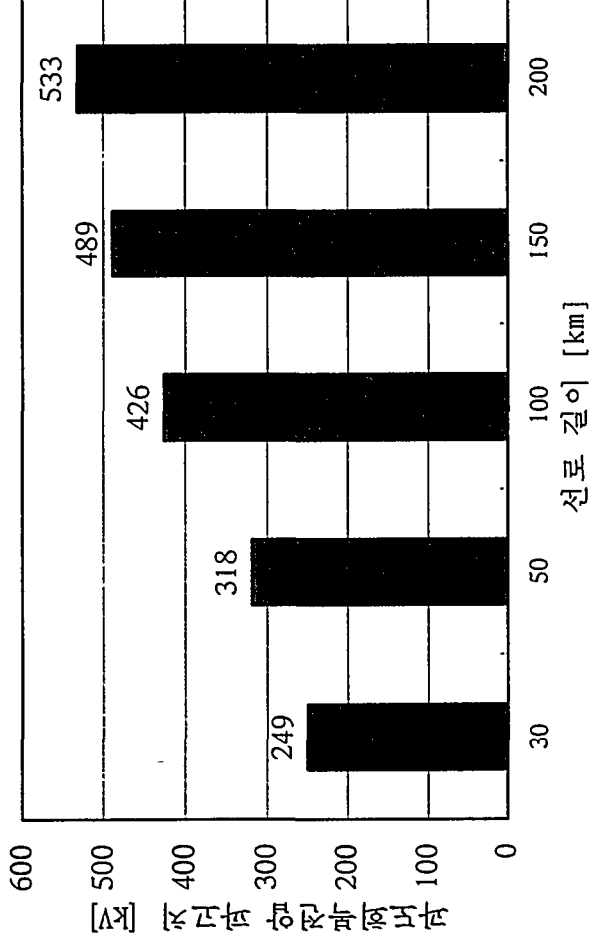


그림 7.27 선로 길이에 따른 과도회복전압 파고치

(2) 과도회복전압의 상승률

(가) 단순 사고시 과도회복전압 상승률

<그림 7.28>에 단순사고시 사고 상수에 따른 고속절지개폐기의 과도회복전압 상승률 변화를 도시하였으며, <그림 7.29>에는 선로 길이에 따른 과도회복전압 상승률 변화를 나타내었는데, 단상 고장시 보다는 다상 고장시에, 긴 선로보다는 짧은 선로에서의 과도회복전압 상승률이 크게 되는 경향을 보이고 있다. 이 결과와 <그림 7.18> 및 <그림 7.19>에 도시한 차단전류 해석 결과와 비교 분석하면, 일반적으로 차단 전류가 커지면 발생하는 과도회복전압의 상승률도 커짐을 알 수 있다.

한편 과도회복전압 파고치와 상승률간의 상관관계는, <그림 7.23> 및 <그림 7.24>에 나타낸 해석 결과와의 비교분석에 의해 다음과 같이 추정할 수 있다.

- 동일 조건에서는 상승률이 커지면 파괴치도 커진다.
- 선로가 길어지면 충전용량도 증가되어 상승률이 완화된다.

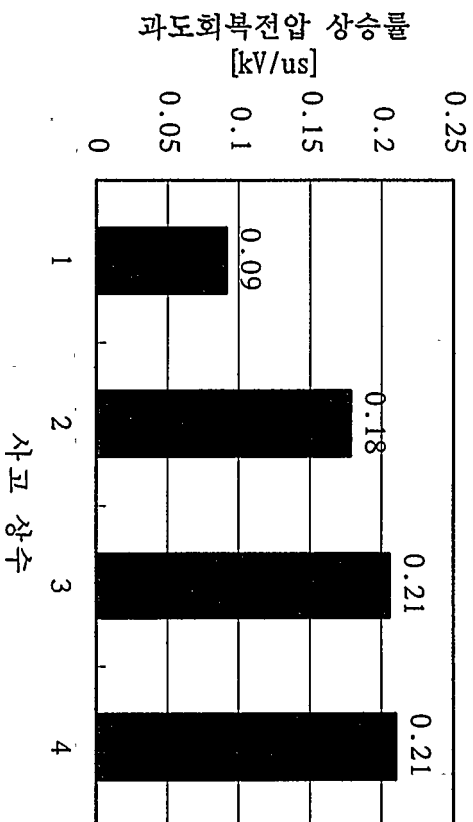


그림 7.28 단순 사고시 사고 상수에 따른 과도회복전압 상승률

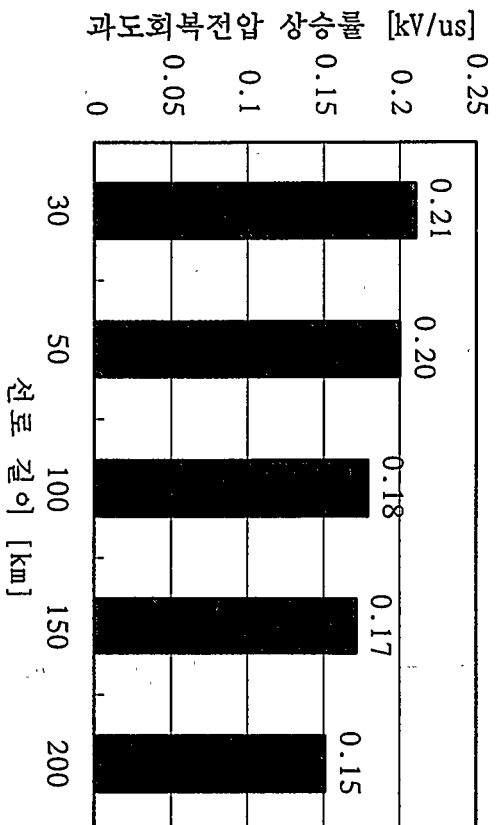


그림 7.29 단순 사고시 선로 길이에 따른 과도회복전압 상승률

(나) 복합 사고시 과도회복전압 상승률

복합 사고시 후속고장 발생위치에 따른 과도회복전압 상승률 변화를 <그림 7.30>에 나타내었으며, <그림 7.31>에는 등가 전원 임피던스에 따른 변화를 도시하였는데, 단순 사고시와 마찬가지로 동일 조건에서는 차단전류가 큰 경우에 발생하는 과도회복전압 상승률이 가혹함을 알 수 있다.

또한 <그림 7.32>에 복합 사고시 선로 길이에 따른 과도회복전압 상승률 변화를 도시하였는데, 단순 사고시 발생 양상과 같이 선로 길이가 길어지면 충전 용량 증가에 따라 상승률이 완화되는 경향을 나타내고 있으나, 단순 사고시에 비해 변화폭이 훨씬 크게 나타났다.

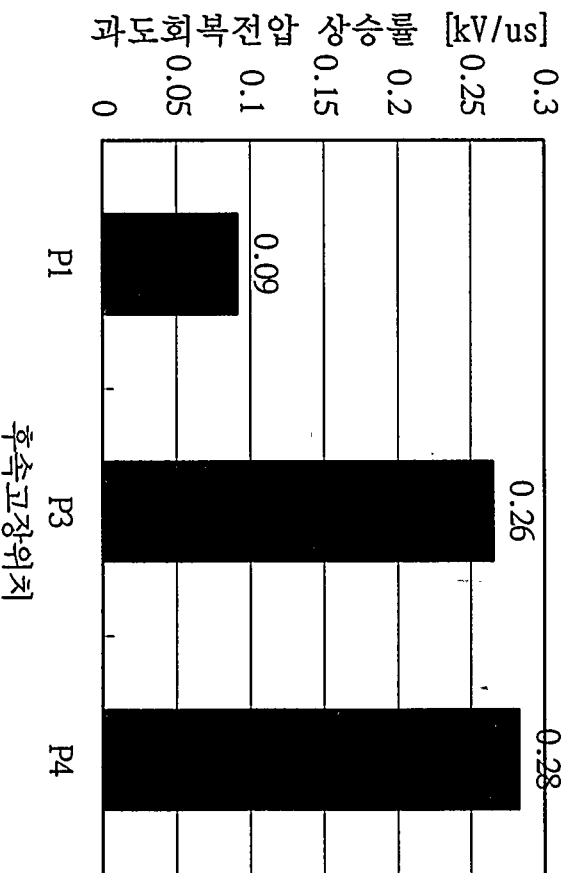


그림 7.30 후속고장위치에 따른 과도회복전압 상승률

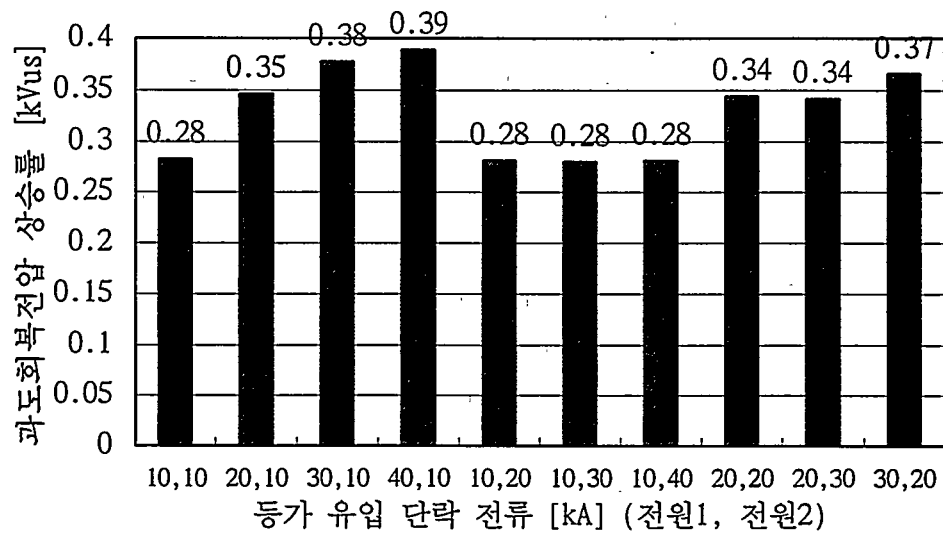


그림 7.31 등가 전원 임피던스에 따른 과도회복전압 상승률

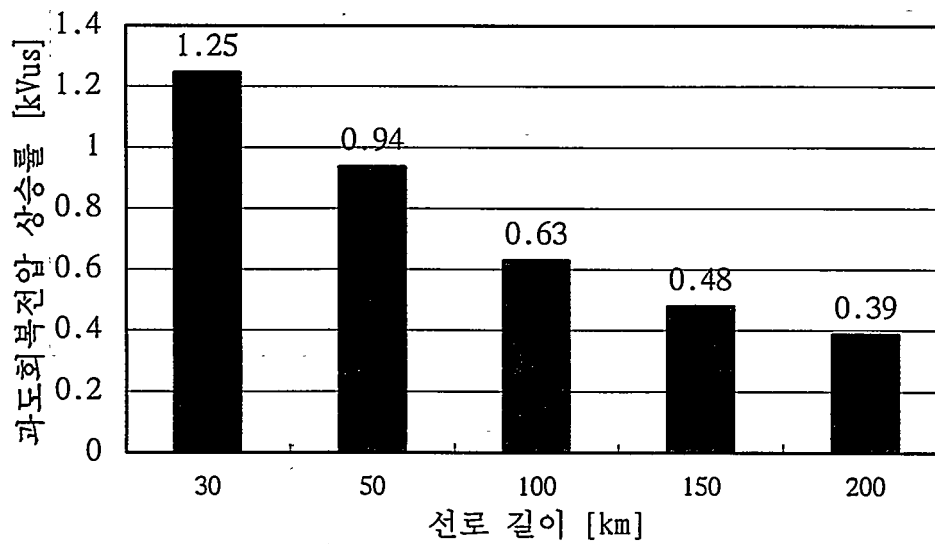


그림 7.32 선로 길이에 따른 과도회복전압 상승률

5. 고속접지개폐기의 영점추이현상

일반적으로 영점추이현상이란 차단기에 의해 고장전류를 차단하고자 할 때, 고장전류에 포함되어있는 직류성분에 의해 고장전류의 전류영점이 상당기간 발생되지 않는 현상을 칭하는데, 고속접지개폐기의 경우에는 실질적으로 고장 전류가 흐르지는 않으나, 동작중에 타상 또는 타회선에 후속고장이 발생하여 후속고장상에 감쇠하는 직류분이 포함된 고장전류가 흐르고 이에 의한 전자 유도에 의해 고속접지개폐기에도 감쇠하는 직류분이 포함된 전류가 흐르게 된다.

고장전류를 차단하는 일반적인 차단기의 영점추이현상은 고장전류에 증첩된 직류성분전류의 감쇠정도에 따라 정해지므로, 계통의 단락용량과 감쇠정수에 의해 영점추이기간을 예측할수 있으나, 고속접지개폐기에서의 영점추이현상은 계통의 단락용량과 감쇠정수 뿐만아니라 상도체 상호간의 유도결합계수, 선로정수 등을 추가로 고려하여 검토해야 한다.

여기에서는 간단한 모델을 상정하여 개념적인 영점추이현상에 대해 검토하고, 이를 토대로 <그림 7.17>에 나타낸 모델 계통에서의 영점추이현상에 대하여 검토한 내용을 기술하였다.

가. 유도전류분석

고속접지개폐기가 동작중일 때 타상 또는 타회선으로부터의 전자유도특성을 검토하기 위한 모델을 <그림 7.33>에 나타내었다.

<그림 7.34>에 교류전류에 의한 전자유도전류를 나타내었는데, 본선에 흐르는 전류와 거의 동상의 유도전류가 발생되고 있으며, 약간의 위상차가 생성됨으로 인해, 고속접지개폐기에는 본선 전류 차단시 약간의 유도전류가 직류 잔류전류로 존재하게 된다.

<그림 7.35>에 직류전류에 대한 유도전류를 도시하였으며, 이 때 특정 시점에서 강제적으로 직류전류를 차단할 때의 유도전류특성을 검토하였다.

직류전류에 의한 유도전류는 <그림 7.34>에 나타난 교류전류에 의한 유도전류에 비해 시정수가 크며, 본선의 직류전류가 급격히 0이 되어도 고속접지개폐기가 동작하고 있는 상의 유도전류는 본선과 동상으로 0이 되지않고, 상당기간 잔류전류가 지속됨을 알 수 있다.

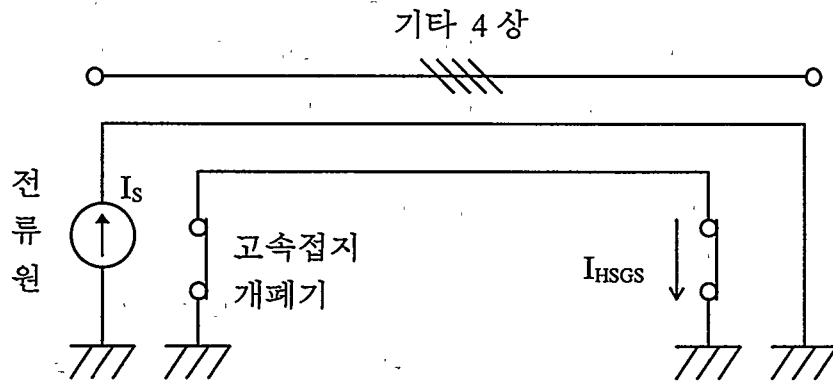


그림 7.33 고속접지개폐기의 전자유도전류 검토 모델

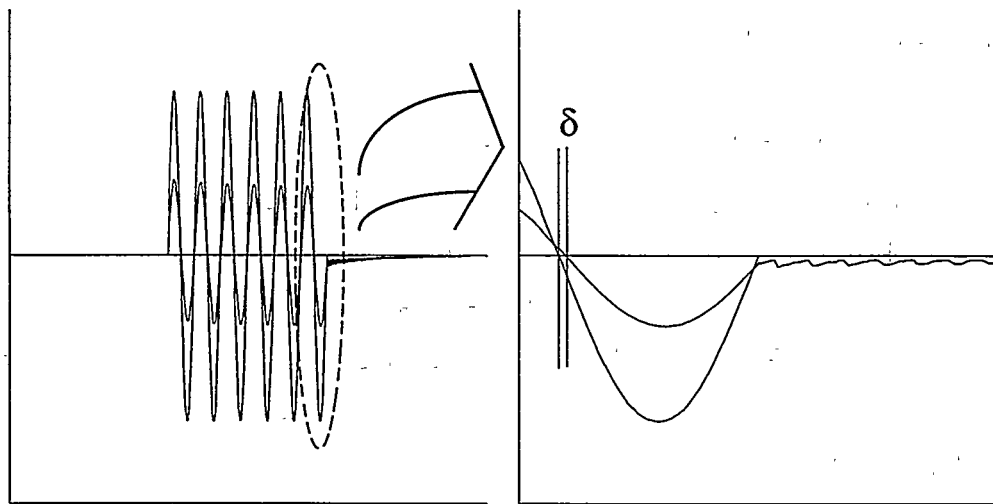
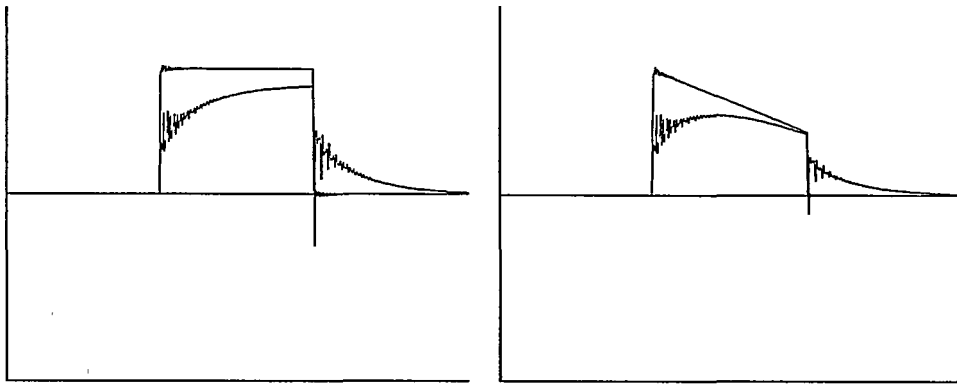


그림 7.34 교류 전자유도전류



(가) 감쇠없는 직류에 의한
유도 전류

(나) 감쇠있는 직류에 의한
유도 전류

그림 7.35 직류 전자유도전류.

한편 <그림 7.36>에 본선에 직류 및 교류가 중첩되어 흐르는 경우의 전자 유도전류를 도시하였으며, 그림에서 알 수 있듯이 본선 전류가 차단되어도 고속접지개폐기에는 상당기간 직류분 잔류전류가 흐르게 되는데, 이는 본선전류와 유도전류가 동상이 되지 못하기 때문일 것으로 사료된다.

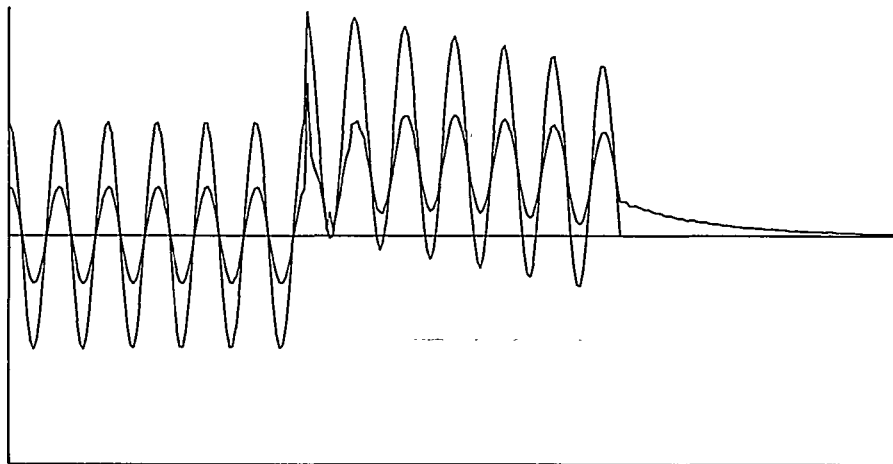


그림 7.36 직교류 중첩전류에 대한 전자유도전류

<그림 7.37>에는 일반적인 고속접지개폐기 동작시 전자유도전류에 대한 특성을 검토하기 위해 한 상에는 직교류가 중첩된 고장전류를 주입하고, 다른 상에는 부하전류를 모의하기 위한 단순 교류를 주입한 경우에 고속접지개폐기가 동작중인 상의 전자유도전류를 도시하였는데, 부하전류는 고장전류 교류성분의 1/10로 두었다.

그림에서 구간 1은 단순 부하전류에 의한 유도성분만 존재하는 구간이며, 구간 2는 고장발생으로 인해 고장전류에 의한 유도성분이 발생하는 구간이며, 구간 3은 고장제거후 잔류전류와 부하전류에 의한 유도전류가 남아있는 구간이다. 구간 2에서 보면, 매우 큰 직류분이 포함된 고장전류에 영점추이현상이 발생할 가능성을 알 수 있으며, 이에 의해 고속접지개폐기에 유도되는 전류에도 영점추이현상이 발생될 것으로 추정할 수 있다. 구간 3에서는 직류분에 의한 잔류유도전류에 의한 영점추이현상이 발생되는데, 잔류유도전류와 부하전류에 의한 유도전류와의 크기 관계에 의해 영점추이기간이 상당히 달라질 것으로 예상할 수 있다.

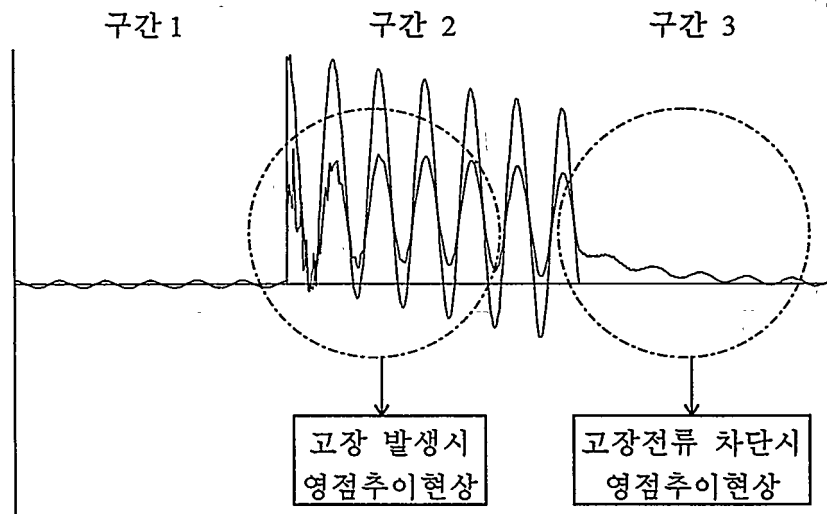


그림 7.37 부하전류 및 직교류중첩 고장전류에 의한 전자유도전류

나. 모델계통에서의 고속접지개폐기의 영점추이현상

<그림 7.17>에 도시한 고속접지개폐기 동작특성을 검토하기 위한 모델계통에서의 영점추이현상에 대해 검토하였다.

전술한 바와 같이 후속고장이 발생되면 고속접지개폐기에는 2가지 종류의 영점추이현상이 발생될 것으로 예측할 수 있다. 즉 후속고장발생시 고장전류 중 직류성분에 의한 영점추이현상과 고장제거후 유도전류의 직류잔류전류분에 의한 영점추이현상의 2가지를 예측할 수 있다.

<그림 7.38>에 <그림 7.17>의 모델 계통에서 후속고장발생 및 제거에 의한 영점추이현상 발생 예를 도시하였는데, 고장전류에 의한 영점추이현상은 <그림 7.37>에 도시한 결과와 유사하게 발생되고 있으나, 후속고장발생상을 차단기(후속고장이 발생된 상에 설치된)가 차단한 후의 영점추이현상은 <그림 7.37>과는 다른 양상을 띠고 있다.

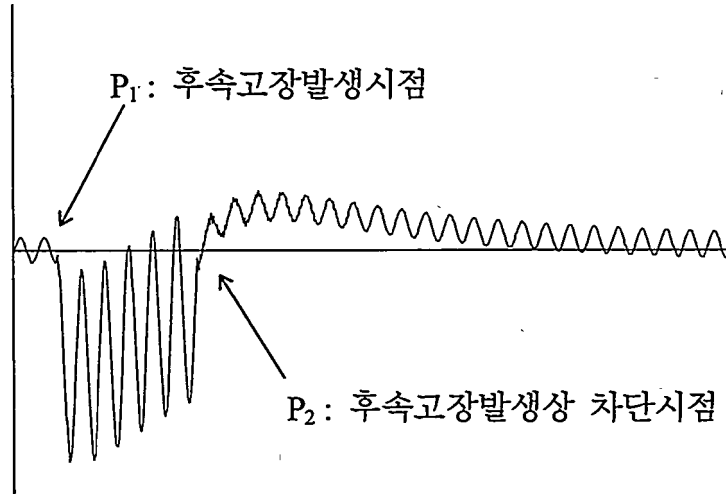


그림 7.38 후속고장에 의한 고속접지개폐기의 전자유도전류

<그림 7.38>에 나타난 해석결과는 A1 상의 고속접지개폐기가 닫힌 상태에서, 모선 2부근에서 C1 상에 지락고장이 발생하여 약 6주기 정도 고장전류가 흐르다가, C1 상의 차단기가 개방되는 경우를 모의한 결과이다.

고속접지개폐기가 동작중인 A1 상에 흐르는 유도전류는 그외 다른 상들로부터 유도되는 성분이 중첩되어 나타나는데, <그림 7.39>에 각 상에 흐르는 전류와 이에 의해 A1 상에 유도되는 전자유도전류를 도시하였으며, <그림 7.40>에 <그림 7.39>에 나타난 각 성분전류를 중첩한 결과를 도시하였다.

<그림 7.39>과 <그림 7.40>으로부터 <그림 7.38>의 해석결과와 <그림 7.37>에 나타난 현상과의 차이점을 다음과 같이 유추할 수 있다.

- 2 회선이 병렬로 운전되고 있으므로, 등가 전원 1에서 전원 모선 2부근의 후속고장까지의 고장전류는 C1 및 C2 두상에 의해 공급되어진다. 따라서 단일 선로에 의해 직류중첩고장전류를 표현한 <그림 7.37>의 결과와는 고장전류에 의한 유도현상에 약간의 차이가 생긴다.
- 후속고장차단시에 선로 양단 차단기가 동시에 동작하지 않으므로, 어느 한쪽 차단기가 차단된 후에도 C2 상을 통해 양쪽 전원 모두에서 고장전류가 공급된다(물론 이 때에는 고장전류 경로 임피이던스가 증가하므로, 기공급되던 양보다는 작아진다.). 따라서 양단 차단기의 비동시동작에 의한 추가적인 과도현상이 발생되어진다.
- 또한 후속고장상이 차단되면, 모선 1에선 모선 2로의 조류중 C1 및 C2 상이 담당하던 전류가 C1 만을 통해 흐르게 되므로, C2 상으로부터 유도되는 성분이 커지게 될 뿐아니라, <그림 7.39>에 나타난 것과 같이 반대극성의 감쇠하는 직류성분을 포함하게 된다.

- 즉 2 회선 선로를 구성하는 각 상들이 계통조건이 변화되면, 상호작용을 하게되므로, <그림 7.37>에서 한 상만의 전류조건을 변화시킨 결과와는 다른 양상을 띠게 된다.

한편 <그림 7.17>의 모델계통에서 선로길이, 조류 및 등가 전원 임피이던스 등 계통조건을 변화시켜 해석한 결과도 정도의 차이는 있으나 <그림 7.38>와 거의 유사한 양상을 띠게 된다. <그림 7.41>에 선로 길이만을 변화시켜 해석한 결과를 나타내었는데, 선로 길이가 짧아지면 고장 임피이던스도 줄어들게 되어 고장전류가 커지게 되므로 후속고장차단후의 영점추이시간이 길어지게 되는 양상을 보이고 있다.

<그림 7.42>에는 후속고장위치에 따른 영점추이현상 변화를 도시하였는데, 후속고장이 선로 중앙 부근에서 발생한 경우보다 선로 양단 부근에 발생한 때의 영점추이현상이 심화되는데, 이는 선로 중앙부근에 후속고장이 발생되면 선로 양방향으로부터 고장전류가 흐르게 되어 고속접지개폐기에 유도되는 전류는 상호 상쇄되는 효과가 나타나기 때문일 것으로 사료된다.

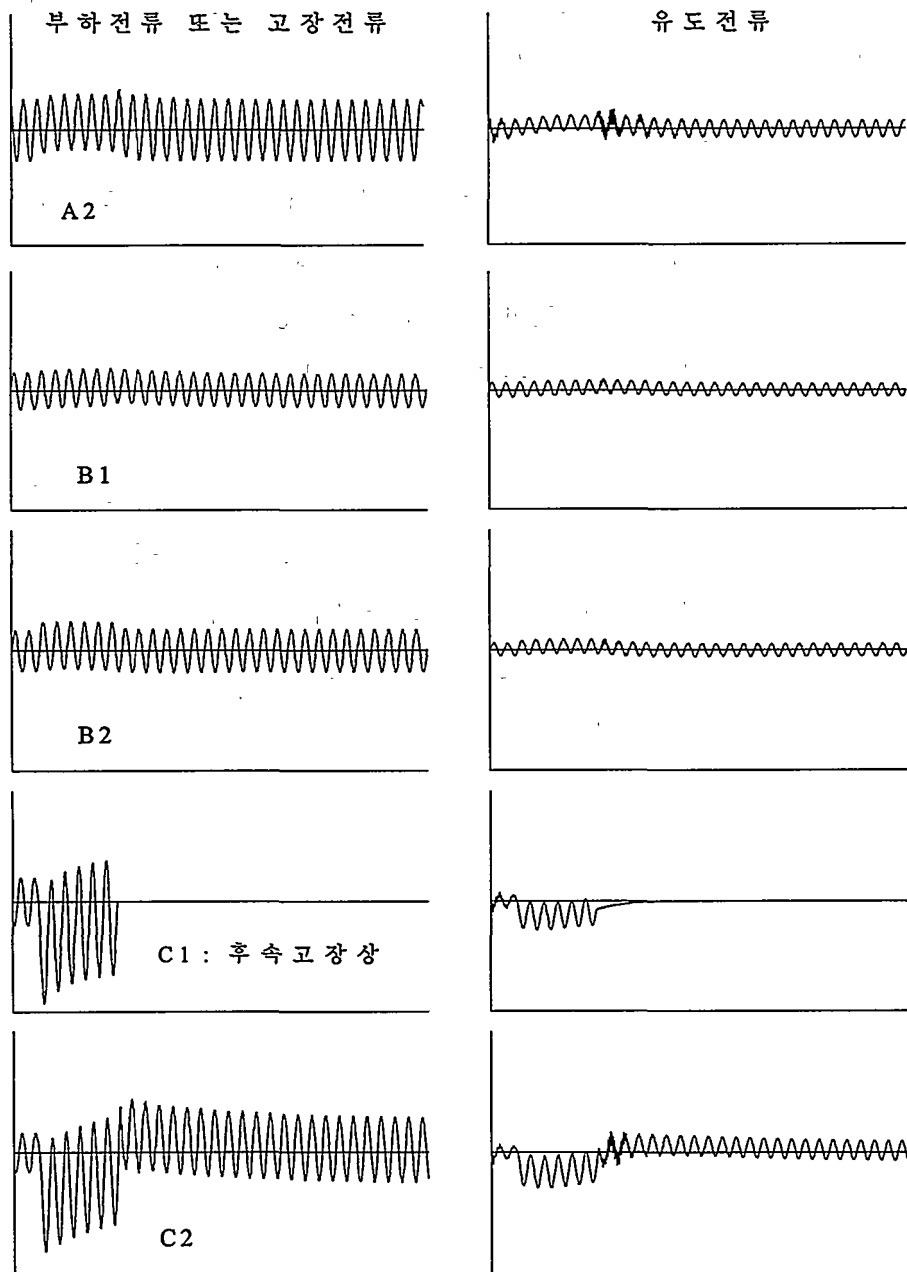


그림 7.39 각 상에 의해 유도되는 전류성분

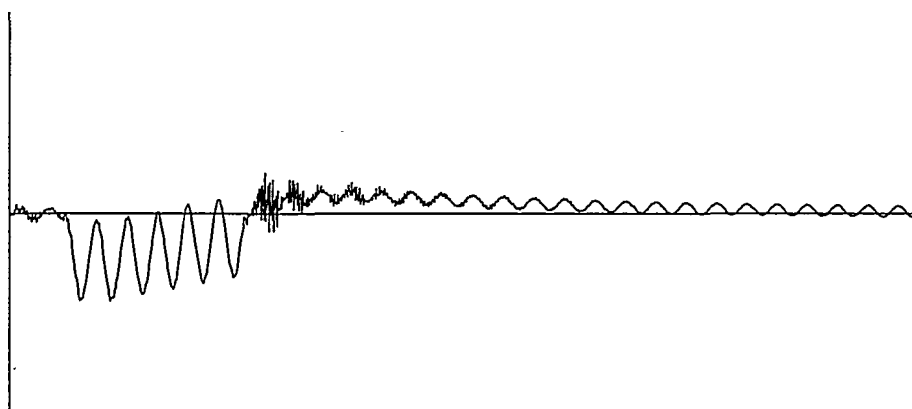


그림 7.40 각 성분전류의 중첩에 의한 유도전류

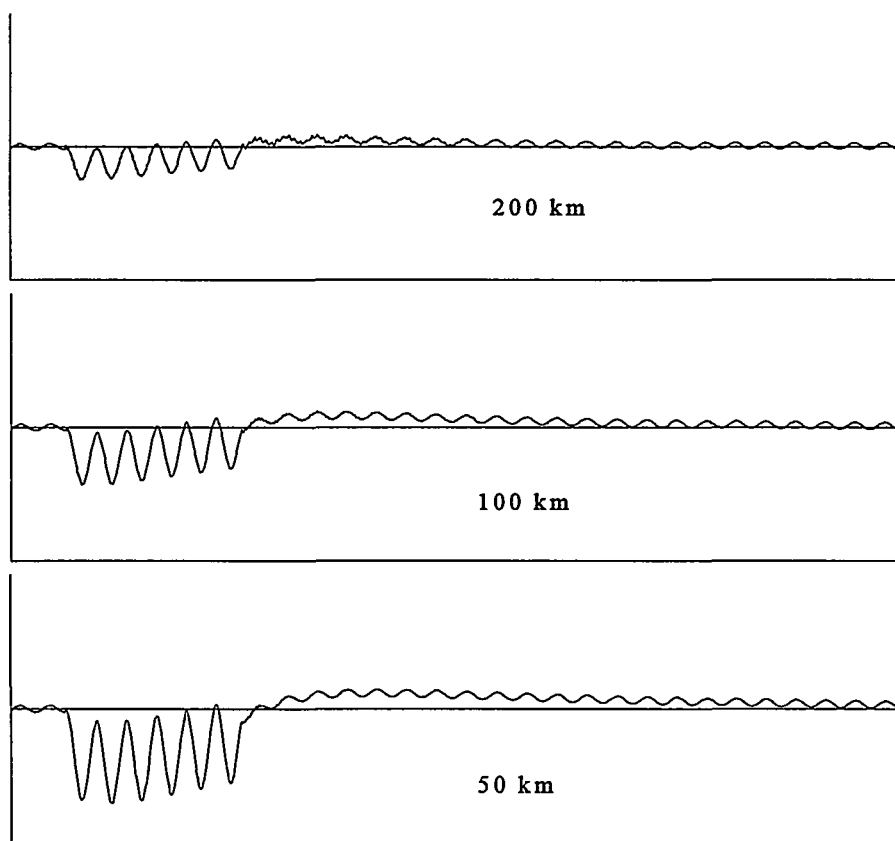


그림 7.41 선로 길이에 따른 영점추이현상 변화

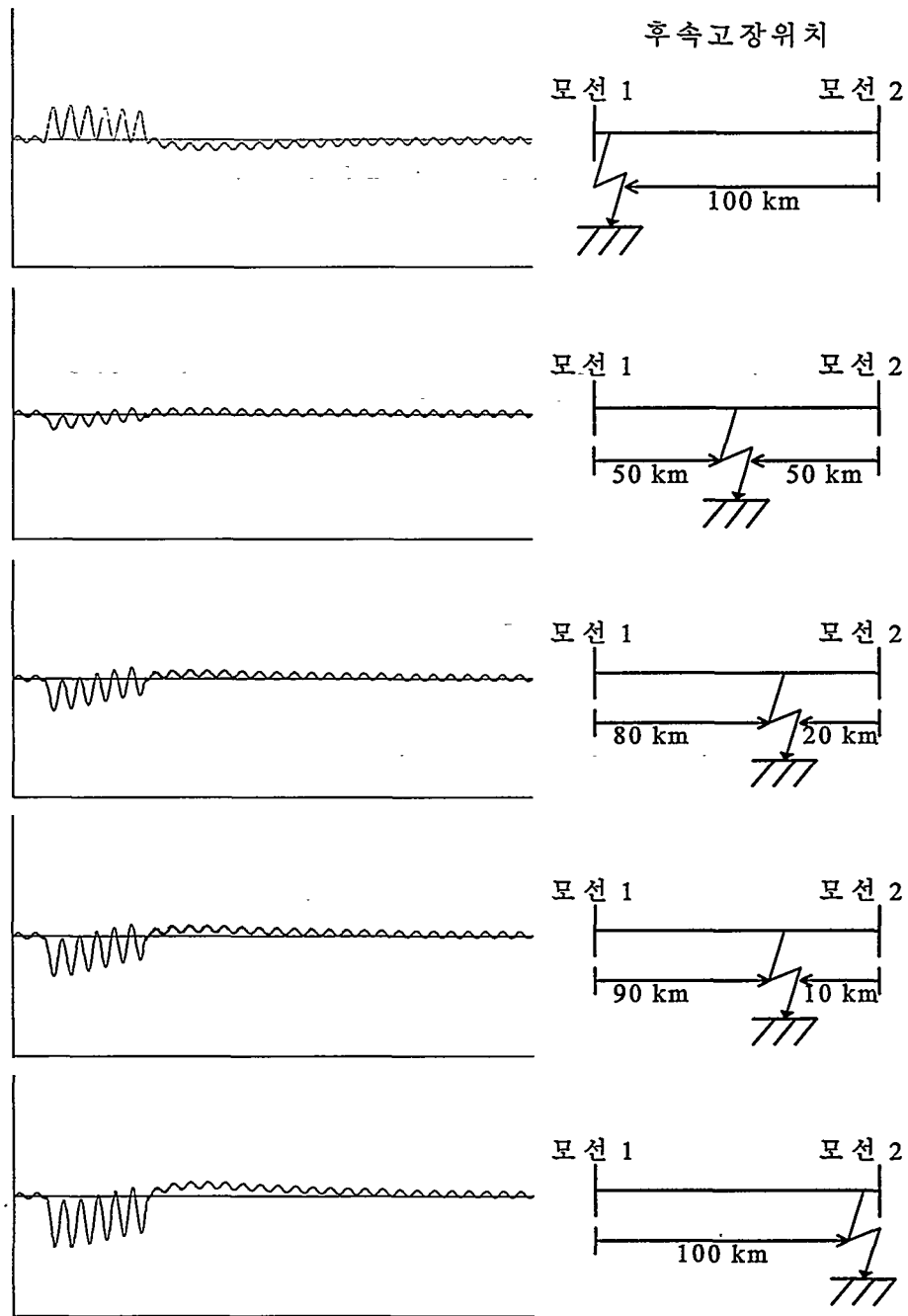


그림 7.42 후속고장위치에 따른 영점추이현상 변화

다. 추후 검토해야할 사항

앞서 검토한 바와 같이 고속접지개폐기가 동작중에 타상 또는 타회선에 후속고장이 발생하면 계통 조건, 후속고장발생시점 및 후속고장위치에 따라 고속접지개폐기에 영점추이현상 발생이 예상된다. 영점추이현상에 의해 고속접지개폐기를 원하는 시간에 차단하지 못하게 되면, 차단기 재투입실패로 인해 영구사고로 이행되므로 이에 대한 적절한 대책이 마련되어야 한다.

따라서 765kV 송전선로에 고속접지개폐기를 적용하기 위해서는 다음 사항들에 대한 상세한 추가 검토가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

- 영점추이현상 발생 확률 (영점추이기간과의 상관관계 포함)
- 강제 영점 생성 방법
- 복합 고장시 재투입 시퀀스

제 8 장 결 론

본 연구는 국내 765kV 계획 계통의 절연협조설계를 위한 연구로서, 특정 대상에 한정된 상황을 중심으로 검토하였으므로, 모든 765kV 계통에 그대로 적용할 수는 없으나, 일반적인 검토 흐름 및 기본적인 자료로는 참고가 가능할 것으로 생각된다.

국내 765kV 계획 계통(본 연구의 대상 계통)은, 송전선로 및 첩탑형상이 타국의 기존 동급 계통과는 다른 2회선 형식으로 건설될 예정이며, 변전소도 국내 입지여건을 고려하여 외국의 기존 765 kV급에는 적용되고 있지 않은 전가스절연변전소(Full GIS)를 주 대상으로 상정하고 있으므로, 검토 사항 및 발생 현상이 다른 나라에서의 그것과는 다소 다른 양상을 띠 것으로 예상된다. 따라서 다른 나라의 기존 자료를 그대로 인용할 수 없으므로 기본적인 사항부터 검토하였다.

본 연구 대상 계통에서 송전선로 절연설계의 기본이 되는 개폐과전압 선정에 있어서, 통상 주 고려 대상으로 알려져 있는 재투입과전압보다 오히려 고장전류 차단시의 차단과전압이 가혹하게 나타났다. 재투입과전압은 차단기 투입저항 등의 적극적인 적용에 의해 직접적으로 억제할 수 있고, 차단과전압도 차단저항을 사용하면 다소 억제할 수는 있으나 차단저항 적용 비용이 과다하기 때문에 이의 적용에 의한 절연비용 절감효과는 기대하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 투입저항을 적용하고, 차단저항을 고려하지 않는 것을 조건으로 개폐과전압 배수를 선정하였다.

변전소 절연설계 및 절연협조의 기본이 되는 뇌과전압 해석에 있어서, 국내 뇌격에 대한 자료가 미흡하기 때문에 상당부분을 가정 또는 추정에 의존하였는데, 우리나라의 연간뇌우일수와 외국의 연간뇌우일수의 비교 및 외국에서의 전력계통 뇌과전압 해석을 위한 뇌격의 상정값 등을 고려할 때, 본 연구에서 상정한 뇌격 조건은 매우 가혹할 것으로 생각되며, 국내 뇌격에 대한 상세한 자료가 확보되어 이를 반영하면 보다 합리적이고 경제적인 뇌과전압에 대한 절연협

조설계가 가능해 질 것으로 생각된다.

한편, 대상 계통에서의 과도회복전압은 적정 상정 조건 하에서는 우려할 정도로 가혹하게 발생되지 않았으나, 고속개폐를 위한 고속접지개폐기 적용시의 과도현상에 있어서는 충분한 검토가 수행되지 못하였으므로, 이를 적용하기 위해서는 적용 조건 및 발생 현상에 대한 추가 검토가 계속되어야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. 한국전력공사, “배전선 절연설계에 관한 연구(I)”, 1989.12.
2. 한국전력공사, “배전선 절연설계에 관한 연구(II)”, 1992.3.
3. 한국전력공사, “송전계통의 고유과도회복전압에 관한 연구(중간보고서)”, 1989.5.
4. 한국전력공사, “송전계통의 고유과도회복전압에 관한 연구(최종보고서)”, 1990.5.
5. 한국전력공사, “765 kV 초고압 보호계전 방식에 관한 연구”, 1994.12.
6. 電力中央研究所, “UHV 送電系統の 絶縁”, 1982.9.
7. 電力中央研究所, “發變電所耐雷設計 ガイドブック”, 1976.3.
8. 電力中央研究所, “送電線耐雷設計 ガイドブック”, 1976.3.
9. 電力中央研究所, “UHV 交流送電に 關する 實證研究 (絶縁特性)”, 1985.3.
10. 電力中央研究所 UHV 送電特別委員會 機器部會 第2次中間報告 “UHV 交流機器及び 變電所の 概念設計”, 1979.7.
11. 電力中央研究所 UHV 送電特別委員會 機器部會 第4次中間報告 “機器絶縁試驗法の 檢討”, 1980.4.
12. 電力中央研究所 UHV 送電特別委員會 機器部會 第8次中間報告 “UHV 交流機器の 試験電壓に 關する 檢討”, 1982.2.
13. 渡邊 勉, 小笠原勝彦, 田中俊輔, “1000 kV 系統における 零点推移現象解析”, 電氣學會研究會資料 SP-94-49 HV-94-120, 1994.11.
14. 渡邊 勉 外, “1000 kV 高速接地開閉器に 關する 系統解析”, 電氣學會研究會資料 SP-94-50 HV-94-121, 1994.11.
15. Electric Power Research Institute, “Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above/Second Edition”, 1982.

16. General Electric, "Transmission Design at 800 kV", 1982.
17. IEC 56, High-voltage alternating-current circuit breakers, 1987.
18. D.E.Hedman, S.R.Lambert, "Power System Circuit Breaker Transient Recovery Voltage", IEEE PAS-95, 1976.
19. E.W.Schmunk, "Power System TRV Characteristics", IEEE Seminar /Report, 1987.
20. IEC Standards No. IEC-305, 1978
21. IEC Standards No. IEC-383, 1983
21. NGK Cat. No. 143
23. SEDIVER, "Tiughened glass insulator catalogue", 1991
24. IEC Standards No. IEC-815
25. 한전 기술연구원, "전력설비의 염진해 대책에 관한 연구", 1988
26. 日本電氣學會, "碍子類の汚損特性に 關する 現狀技術調査", 技術報告 450
27. NGK, "NGK Rev.-51"
28. CRIEPI, "187-1100 kV 交流送電線の 電氣的設計 ハンドブック", 1986
29. CRIEPI, "UHV 交流送傳(絶縁部會報告書)", 1982
30. IEC Standards No. IEC-507
31. A.R. Hileman, "Insulation Coordination" ABB POWER SYSTEMS INC., 1991
32. IEC Standards, IEC 60-1, 1973
33. TEPCO, "1000 kV 送電線路 設計要項書"
34. 日本 中部電力, "500 kV 第2外輪線 基本設計"
35. KEPCO, "765 kV 송변전 금구류 설계 및 제조기술 개발에 관한 연구", 1993
36. M. Darveniza, F. Popolansky and E.R. Whitehead, "Lightning Protection of UHV Transmission Lines", Electra, No. 41, 1975
37. 한전계통운용처, "보호계전기 동작상태 분석보고서(1971~1992)"
38. 日本電氣學會, "架空送電線の 絶縁設計要綱", 技術報告(II部) 第 220 號, 1986

1. The first part of the paper is devoted to a discussion of the various methods of determining the rate of growth of the economy.

2. The second part of the paper is devoted to a discussion of the various methods of determining the rate of growth of the economy.

3. The third part of the paper is devoted to a discussion of the various methods of determining the rate of growth of the economy.

4. The fourth part of the paper is devoted to a discussion of the various methods of determining the rate of growth of the economy.

5. The fifth part of the paper is devoted to a discussion of the various methods of determining the rate of growth of the economy.

6. The sixth part of the paper is devoted to a discussion of the various methods of determining the rate of growth of the economy.

7. The seventh part of the paper is devoted to a discussion of the various methods of determining the rate of growth of the economy.

8. The eighth part of the paper is devoted to a discussion of the various methods of determining the rate of growth of the economy.

9. The ninth part of the paper is devoted to a discussion of the various methods of determining the rate of growth of the economy.

10. The tenth part of the paper is devoted to a discussion of the various methods of determining the rate of growth of the economy.

11. The eleventh part of the paper is devoted to a discussion of the various methods of determining the rate of growth of the economy.

12. The twelfth part of the paper is devoted to a discussion of the various methods of determining the rate of growth of the economy.

13. The thirteenth part of the paper is devoted to a discussion of the various methods of determining the rate of growth of the economy.

14. The fourteenth part of the paper is devoted to a discussion of the various methods of determining the rate of growth of the economy.

15. The fifteenth part of the paper is devoted to a discussion of the various methods of determining the rate of growth of the economy.

16. The sixteenth part of the paper is devoted to a discussion of the various methods of determining the rate of growth of the economy.

17. The seventeenth part of the paper is devoted to a discussion of the various methods of determining the rate of growth of the economy.

부 록

부록 1. 절연협조 관련 용어 정의 및 순서

(IEC 71-1 기준)

가. 용어 정의

각종 개념의 혼동을 피하기 위해 먼저 절연 협조에 관계되는 각종 용어들의 정의에 대해, IEC 71-1 (Insulation co-ordination Part1:Definition, principles and rules, 7th edition 1993-12) 을 기준으로 국내 765kV 송전계통에 관계된 부분만 발췌하여 기술하였다.

1) 외부 절연 (External insulation)

스트레스가 가해지는 고체 절연물의 기중 거리 및 대기와 접촉된 표면 거리를 일컫는 것으로써, 기상 및 오존, 습도, 해충 등 외부 조건의 영향을 받는다.

2) 내부 절연 (Internal insulation)

대기 및 기타 외부 조건의 영향을 받지 않도록 보호된, 기기 내부의 고체, 액체 및 기체 절연 부분을 칭한다.

3) 자기 복귀 절연 (Self-restoring insulation)

파열 방전 후, 방전 전의 절연 특성이 완벽하게 복구되는 절연을 일컫는다.

4) 비자기 복귀 절연 (Non-self-restoring insulation)

파열 방전 후, 방전 전의 절연 특성이 완벽하게 복구되지 않거나, 특성을 잃어버리는 절연을 일컫는다.

5) 절연 형상 단자 (Insulation configuration terminal)

절연물에 전압 스트레스가 가해질 수 있는 모든 형태의 전극을 칭하는 것으로써, 다음과 같이 분류된다.

- 상 단자(Phase terminal) : 계통의 선간전압이 가해지는 단자 및 중성점과 함께 계통의 상전압이 가해지는 단자
- 중성 단자(Neutral terminal) : 계통의 중성점 또는 이에 접속된 단자

- 접지 단자(Earth terminal) : 항상 대지에 직접 접속된 단자

6) 절연 형상 (Insulation configuration)

적용 중의 절연물과 모든 단자를 포함하는 절연체의 완전한 기하학적인 형상을 일컫는 것으로써, 유전 특성에 영향을 주는 모든 요소(절연부 및 도체부)를 포함하며, 다음과 같이 구분된다.

- 삼상(Three-phase) 절연 형상 : 세개의 상 단자, 하나의 중성 단자 및 하나의 접지 단자를 갖는 형상
- 상대지(Phase-to-earth) 절연 형상 : 2 개의 상 단자를 무시하고, 특별한 경우를 제외하고는 중성 단자가 접지된 삼상 절연 형상
- 상간(Phase-to-phase) 절연 형상 : 1 개의 상 단자를 무시한 삼상 절연 형상으로써, 특별한 경우에는 중성 단자 및 접지 단자도 무시한다.
- 종방향(Longitudinal) 절연 형상 : 2 개의 상 단자와 1 개의 접지 단자를 갖는 형상으로써, 2 개의 상 단자는 3 상 계통에서 어떤 한 상을 개폐장치에 의해 일시적으로 분리하여 구성하고, 그 외의 상에 의한 4 개의 상 단자는 무시 또는 접지한다. 특별한 경우에 2 개중 1 개의 상 단자는 접지한다.

7) 계통 공칭전압 (Nominal voltage of a system)

계통을 정의하거나 지칭하기 위해 사용되는 개략적인 전압값으로 정의된다.

8) 계통 최고전압 (Highest voltage of a system)

계통 내의 임의의 지점에서 임의의 시간에 정상적인 운전조건에서 발생가능한 가장 높은 운전전압으로 정의된다.

9) 기기 최고전압 (Highest voltage for equipment)

관련 기기 규격에서 이 전압에 관계된 다른 특성 뿐 아니라, 자체 절연도 고려하여 설계하기 위한 가장 높은 상간 실효전압으로 정의된다.

10) 지락 고장 계수 (Earth fault factor)

삼상 계통에서, 주어진 계통 구성에 대해 임의의 지점에 발생한 1선 또는 2선 지락고장시, 주어진 지점에 발생하는 가장 높은 건전상의 상용주파 상대

지간 전압과 비사고시 동일한 지점의 상용주파 상대지간 전압과의 비로 정의된다.

11) 과전압 (Overvoltage)

기기 최고전압의 파고치를 초과하는 파고치를 갖는 상대지간 또는 상간 전압을 칭한다.

12) 전압 및 과전압 분류

(Classification of voltages and overvoltages)

전압 및 과전압은, 파형 및 지속시간에 따라 다음 등급으로 분류한다.

- 연속(상용주파) 전압 [Continuous (Power frequency) voltage] : 어떤 절연형상의 임의의 단자에 연속적으로 가해지는, 일정한 값의 상용주파 실효치 전압
- 일시 과전압 (Temporary overvoltage) : 상대적으로 긴 지속시간을 갖는 상용주파 과전압
- 과도 과전압 (Transient overvoltage) : 통상 급격히 감쇠되고, 진동하거나 또는 진동하지 않을 수 있으며, 수 ms 이하의 짧은 지속시간을 갖는 과전압
- 합성 (일시 및 과도) 과전압 [Combined (temporary, transient) overvoltage] : 상간 (또는 중방향) 절연 형상의 2개의 상 단자와 대지간에 동시에 인가되는 2개의 전압 성분을 갖는 과전압으로써, 더 큰 파고치를 갖는 성분에 의해 분류된다.

위 분류에서 과도 과전압은 다시 다음과 같이 분류한다.

- 완만파 과전압 (Slow-front overvoltage) : 통상 일방향성을 가지며, 파두장이 $20 \mu s < T_p \leq 5,000 \mu s$, 파미장이 $T_2 \leq 20 ms$ 이다.
- 급준파 과전압 (Fast-front overvoltage) : 통상 일방향성을 가지며, 파두장이 $0.1 \mu s < T_1 \leq 20 \mu s$, 파미장이 $T_2 < 300 \mu s$ 이다.
- 초급준파 과전압 (Very-fast-front overvoltage) : 통상 일방향성을 가지며, 파두장이 $T_1 \leq 0.1 \mu s$, 총 지속시간 $< 3 ms$ 이며, 30 kHz ~ 100 MHz 주파수 범위의 진동이 중첩된다.

13) 표준 전압 파형 (Standard voltage shapes)

표준 전압 파형은 다음과 같다.

- 표준 단시간 상용주파 전압 (The standard short-duration power-frequency voltage) : 60 초간의 지속시간과 48 Hz ~ 62 Hz 범위의 주파수를 갖는 정현파 전압
- 표준 개폐 임펄스 (The standard switching impulse) : 파두장 250 μ s, 파미장 2,500 μ s 를 갖는 임펄스 전압
- 표준 뇌 임펄스 (The standard lightning impulse) : 파두장 1.2 μ s, 파미장 50 μ s 를 갖는 임펄스 전압
- 표준 합성 개폐 임펄스 (The standard combined switching impulse) : 동일한 파고치를 갖는 반대 극성의 2가지 성분이 합성된 임펄스 전압으로써, 정극성 성분은 표준 개폐 임펄스, 부극성 성분은 파두장 및 파미장이 정극성 보다 짧지 않은 개폐 임펄스로 구성된다. 합성 전압의 파고치는 성분들의 파고치를 합한 값이다.

14) 대표 과전압 (Representative overvoltages)

운용중에 여러가지 요인에 의해 발생가능한 주어진 등급의 과전압이 절연물에 끼치는 유전체적 효과와 동일한 효과를 나타낼 수 있도록 가정한 과전압으로써, 그 등급의 표준 파형을 갖는 전압으로 구성되며, 운용 조건 특성을 표현할 수 있는 단일 값 또는 값의 집합 또는 값들의 확률 분포로 정의될 수 있다.

15) 과전압 제한 장치 (Overvoltage limiting device)

과전압의 파고치나 지속시간을 제한할 수 있는 장치를 총칭하는 것으로써, 억제 장치 (Preventing devices, 예 : 투입저항) 또는 보호 장치 (Protective devices, 예 : 피뢰기)로 분류된다.

16) 뇌(또는 개폐) 임펄스 보호 레벨

(Lightning (or switching) impulse protective level)

주어진 조건 하에서 뇌 (또는 개폐) 임펄스가 가해지는 보호 장치의 단자에 나타나는 최대 허용 파고치로 정의된다.

17) 성능 기준 (Performance criterion)

기기에 가해지는 전압 스트레스가, 기기의 절연 또는 연속적인 운용에 영향을 끼칠 수 있는 확률을, 경제적 및 운용상 적절한 수준 이하로 억제하기 위한 기준으로써, 이를 근거로 절연물이 선정된다.

18) 내전압 (Withstand voltage)

특정한 수의 파열 방전이 허용되는 내력 시험에서, 특정 조건 하에서 인가되는 시험 전압을 나타내는 것으로써, 다음과 같이 지칭된다.

- 약정 가상 내전압 (Conventional assumed withstand voltage) : 허용되는 파열 방전 회수가 영이고, 견딜 확률은 100 % 가 된다.
- 통계적 내전압 (Statistical withstand voltage) : 특정 내력 확률과 관계된 허용 파열 방전 회수를 가지며, IEC에서는 특정 내력 확률을 90 %로 한다.

19) 협조 내전압 (Co-ordination withstand voltage)

실제 운용 조건에서 성능 기준에 부합되는, 각 전압 등급에 대한 절연 형상의 내전압 값을 나타낸다.

20) 협조 계수 (Co-ordination factor)

대표 과전압에서 협조 내전압을 구하기 위해 곱해지는 계수이다.

21) 표준 기상 조건 (Standard reference atmospheric conditions)

표준 기상 조건은 다음과 같다.

- 온도 : 20 °C
- 압력 : 101.3 kPa (1,013 mbar)
- 절대 습도 : 11 g/m³

22) 필수 내전압 (Required withstand voltage)

실제 운용 조건 및 전체 운용 기간 중에, 주어진 등급의 과전압에 대한 성능 기준을 만족함을 보장하기 위한 표준 내력 시험에서, 절연물이 반드시 견디어야 하는 시험 전압이다. 필수 내전압은 협조 내전압과 동일한 파형을 가지며, 이를 검증하기 위해 선정된 표준 내전압 시험의 모든 조건을 명시한다.

23) 기상 보정 계수 (Atmospheric correction factor)

표준 기상 조건과 실제 평균 기상 조건과의 차이를 보상하기 위해 협조 내전압에 적용되는 계수로, 외부 절연에만 적용된다.

24) 안전 계수 (Safety factor)

표준 내력 시험 조건과 실제 운용 조건 차이를 보상하기 위해, 필요시 기상 보정 계수를 적용한 후, 협조 내전압에 적용되는 계수로, 필수 내전압을 구하기 위해 사용된다.

25) 표준 내전압 (Standard withstand voltage)

표준 내력 시험에 적용되는 시험 전압의 표준 값으로써, 절연물의 정격값이며, 절연물이 하나 이상의 필수 내전압에 적합함을 나타낸다.

26) 시험 변환 계수 (Test conversion factor)

표준 내전압이 다른 과형으로 선정된 경우에, 표준 내력 시험 전압의 하한치를 구하기 위해 필수 내전압에 적용되는 계수이다.

27) 정격 절연 강도 (Rated insulation level)

절연물의 유전 강도 특성을 나타내는 표준 내전압들의 집합을 칭한다.

28) 표준 절연 강도 (Standard insulation level)

일종의 정격 절연 강도로써, 기기 최고 전압에 관계된 표준 내전압으로 나타내어지며, <표 부1.1> 에 245 kV 를 초과하는 계통에서의 IEC 권장 표준 절연 강도를 나타내었다.

29) 표준 내전압 시험 (Standard withstand voltage tests)

절연물이 적합한 표준 내전압을 가지고 있음을 검증하기 위해 특정 조건에서 수행되는 유전 시험이다. IEC 에서는 다음 시험들이 포함되어 있다.

- 단시간 상용주파 시험 (Short-duration power-frequency tests)
- 개폐 임펄스 시험 (Switching impulse tests)
- 뇌 임펄스 시험 (Lightning impulse tests)
- 합성 전압 시험 (Combined voltage tests)

표 부 1.1 IEC 의 표준 절연 강도 권장치 (기기 최고 전압 > 245 kV)

기기최고전압 [kV], 실효치	표준 개폐 임펄스 내전압			표준뇌임펄스
	종방향절연* [kV], 파고치	상대지간 [kV], 파고치	상간 (상대지간과의 비)	내전압 [kV], 파고치
300	750	750	1.50	850 950
	750	850	1.50	950 1,050
362	850	850	1.50	950 1,050
	850	950	1.50	1,050 1,175
420	850	850	1.60	1,050 1,175
	950	950	1.50	1,175 1,300
	950	1,050	1.50	1,300 1,425
525	950	950	1.70	1,175 1,300
	950	1,050	1.60	1,300 1,425
	950	1,175	1.50	1,425 1,550
765	1,175	1,300	1.70	1,675 1,800
	1,175	1,425	1.70	1,800 1,950
	1,175	1,550	1.60	1,950 2,100
* 관련된 합성 시험에서 임펄스 성분의 값				

나. 절연협조 순서

전력계통 절연협조란 계통을 구성하는 각종 기기 및 설비의 절연강도를 선정하기 위한 일련의 작업들을 칭하는 것으로써, IEC 71-1 규격 조건에 따른 절연협조 흐름도(정격 또는 표준 절연강도 선정 흐름도)를 <그림 부1.1>에 나타내었다.

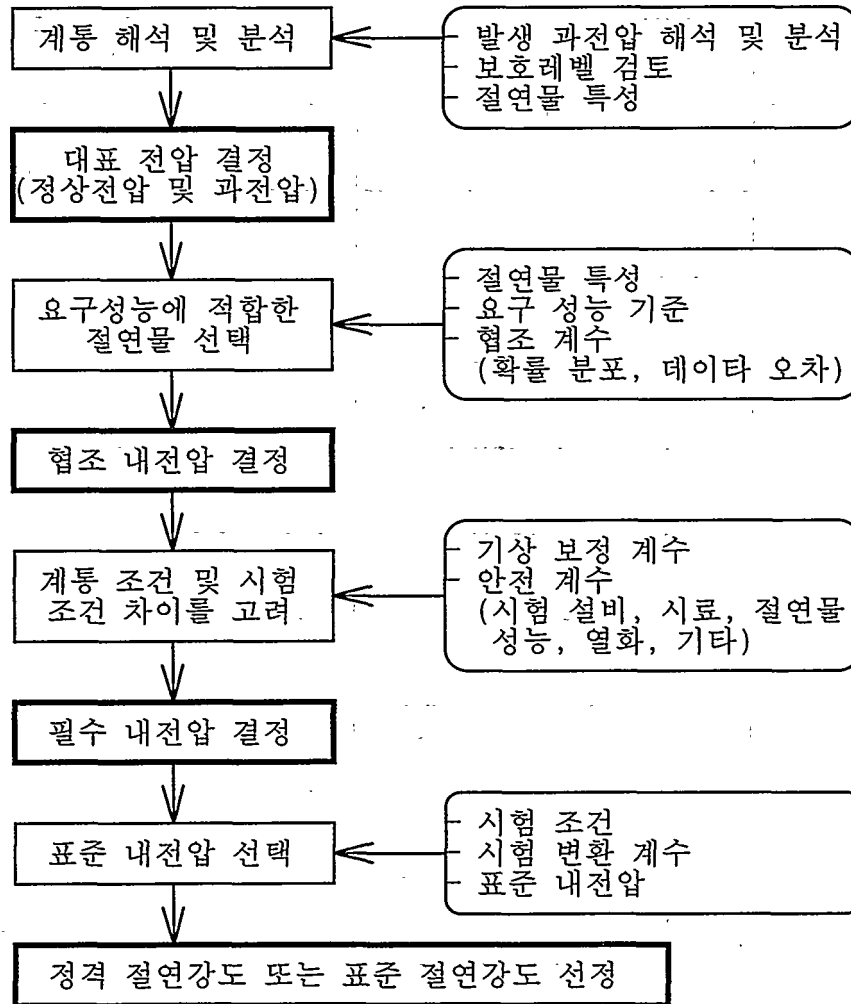


그림 부 1.1 전력계통 절연협조 흐름도

1) 대표 과전압 결정

절연물에 가해지는 전압 및 과전압 스트레스는, 대상 계통 해석 및 분석을 통하여, 크기, 파형 및 지속시간으로 정의되어야 하며, 계통 해석시에는 과전압 제한 장치의 적용 조건을 고려하여야 한다. 이러한 계통 해석을 통하여 각 과전압 등급에 대한 대표 과전압이 결정되어야 하며, 이 때 절연물의 절연 특성을 고려하여야 한다.

대표 과전압은 다음 3가지 방법에 의해 특징지을 수 있다.

- 가상 최대치 또는
- 파고치의 집합 또는
- 파고치의 완전한 통계 분포

가상 최대치가 대표 과전압 선정에 적합할 경우에는, 대표 과전압을 다음과 같이 선정하여야 한다.

- 상용주파 연속 전압에 대한 대표 전압 : 기기의 수명에 상응하는 기간 동안의 계통 최고전압의 실효치
- 일시과전압에 대한 대표 과전압 : 계통의 일시과전압의 가상 최대치를 $\sqrt{2}$ 로 나눈 값이 실효치인 표준 상용주파 단시간 전압
- 완만파 과전압에 대한 대표 과전압 : 완만파 과전압의 가상 최대치의 파고치와 같은 값의 파고치를 갖는 표준 개폐 임펄스
- 급준파 과전압에 대한 대표 과전압 : 급준파 과전압의 가상 최대치의 파고치와 같은 값의 파고치를 갖는 표준 뇌 임펄스
- 초급준파 과전압에 대한 대표 과전압 : 해당 기기에 대해 별도로 정의한다.
- 완만파 상간 과전압에 대한 대표 과전압 : 완만파 상간 과전압의 가상 최대치의 파고치와 같은 값의 파고치를 갖는 표준 합성 개폐 임펄스
- 완만파(또는 급준파) 중방향 과전압에 대한 대표 과전압 : 표준 개폐

(또는 뇌) 임펄스와 상용주파 전압으로 구성되는 합성 전압으로 표현되는데, 각 성분 전압의 파고치는 상응하는 가상 최대치와 같고, 임펄스 파고시점과 상용주파 파고시점은 동시에 발생되며 반대 극성을 갖는다.

2) 협조 내전압 결정

협조 내전압의 결정은, 절연물의 운용 조건하에서 대표 과전압이 가해졌을 때 성능 기준을 만족할 수 있는 최저 내전압을 결정하는 것이다.

절연물의 협조 내전압의 파형은 상응하는 등급의 대표 과전압 파형과 같고, 크기는 대표 과전압에 협조 계수를 곱하여 구하는데, 협조 계수는 대표 과전압 평가의 정확성, 과전압 분포의 경험적 또는 통계적 평가 및 절연물의 특성에 따라 달라진다.

협조 내전압은 약정 가상 내전압 또는 통계적 내전압에 의해 결정될 수 있는데, 이는 결정 순서 및 협조 내전압 계수에 의해 영향을 받는다.

한편 대표 내전압을 구하지 않고도 직접 통계적 협조 내전압을 구할 수 있는데, 이는 과전압 해석시 관련된 절연 특성을 이용하여 사고율을 함께 평가함으로써 가능해진다.

3) 필수 내전압 결정

절연물의 필수 내전압 결정은 협조 내전압을 표준 시험 조건에 적합하도록 변환함으로써 이루어진다. 즉 표준 내전압 시험 조건과 실적용 조건의 차이를 보상하기 위한 계수를 협조 내전압에 곱함으로써 필수 내전압을 구할 수 있다.

협조 내전압으로부터 필수 내전압을 도출하기 위한 계수에는,

- 기기 조립상의 차이
- 제품 품질의 분산성
- 절연물의 품질
- 예상 수명 동안의 절연물 열화
- 기타 영향 요인

등을 보정하여야 된다. 만약 이러한 개개의 영향 요인들에 대해 보정이 곤란할 경우에는, 경험에 의해 전체적인 안전 계수를 적용하여야 한다.

외부 절연일 경우에는, 표준 기상 조건과 실제 기상 조건의 차이를 보상하기 위해 추가의 보상 계수가 적용되어야 한다.

4) 정격 절연 강도 선정

정격 절연 강도의 선정은, 모든 필수 내전압에 충분히 부합되도록, 절연물의 가장 경제적인 표준 내전압들의 집합을 선정하는 것이다.

기기 최고 전압인 절연물의 연속 상용주파 내전압은, 필수 연속 상용주파 내전압 이상인 차상위의 표준 값으로 선정된다.

상대지간, 상간 및 중방향 절연에 대해, 일시, 완만파 및 급준파 필수 내전압에 부합되는 내전압은 필수 내전압과 동일한 파형으로 선정될 수도 있으며, 절연물의 내부 특성을 감안하여 다른 파형으로 선정될 수도 있으며, 내전압의 크기는 다음과 같이 선정된다.

- 동일한 파형의 전압으로 선정할 경우에는, 필수 내전압보다 차상위인 <표 부1.2> 중의 값
- 다른 파형의 전압으로 선정할 경우에는, 관련 시험 변환 계수를 곱한 필수 내전압보다 차상위인 <표 부1.2> 중의 값

표 부 1.2 표준 내전압치

표준 단시간 상용주파 내전압 [kV], 실험치					표준 임펄스 내전압 [kV], 파고치						
10	20	28	38	50	20	40	60	75	95		
70	95	140	185	230	125	145	170	250	325		
275	325	395	460	510	450	550	650	750	850		
570	630	680			950	1,050	1,175	1,300	1,425		
					1,550	1,675	1,800	1,950	2,100		
					2,250	2,400					

5) 기기 최고 전압의 영역

표준 기기 최고 전압은 다음 2가지 영역으로 구분된다.

- 영역 I : 1kV를 초과하고 245kV 이하인 영역으로써, 송전 및 배전 계통 모두에 걸쳐 있으므로, 계통 운용상의 특징에 따라 기기의 정격 절연 강도가 달라지게 된다.
- 영역 II : 245kV를 초과하는 영역으로써, 대개 송전 계통에 속한다.

6) 표준 절연 강도 선정

<표 부1.1>에 나타난 기기 최고 전압과 표준 내전압과의 상관관계는 계속 규격화되어가고 있는데, 이는 IEC 규격에 따라 설계된 계통의 운용 경험을 살리고, 표준화를 확대하기 위함이다.

표준 절연 강도라 함은, <표 부1.1>에서 대상 기기 최고 전압과 표준 내전압치의 연결이 표의 가로선을 횡단하지 않도록 결합하여 선정되는 표준 내전압치를 일컫는다.

한편 영역 II 에서의 상간 및 중방향 절연에 대한 규격화는 다음과 같다.

- 영역 II 에서의 상간 절연 : 표준 상간 뇌 임펄스 내전압은 상대지 뇌 임펄스와 같다.
- 영역 II 에서의 중방향 절연 : 합성(개폐 및 상용주파) 내전압의 표준 개폐 임펄스 성분은 <표 부1.1>에 주어진 값이나, 반대 극성 상용주파 성분의 파고치는 $U_m(\text{기기 최고 전압}) \times \sqrt{2}/\sqrt{3}$ 으로 된다. 그리고 합성(뇌 및 상용주파) 내전압의 표준 뇌 임펄스 성분은 <표 부1.1>에 주어진 상대지간 내전압과 같으나, 반대 극성 상용주파 성분의 파고치는 $0.7 \times U_m \times \sqrt{2}/\sqrt{3}$ 으로 된다.

기술상 및 경제적인 관점에서 표준 절연 강도가 아닌 다른 내전압치를 선정할 수도 있으며, 이 때에도 표준 절연 강도 선정을 제외하고는 앞서 기술한 방법을 따라야 하며, 구해진 표준 내전압들의 집합을 정격 절연 강도라 칭한다.

부록 2. 상용주파 일시과전압에 대한 절연설계

1. 애자의 규격 및 특성

가. 애자의 규격

현재 생산되고 있는 애자의 규격은 주로 IEC 및 ANSI의 규격을 적용하고 있으나 765kV 송전선로에 사용가능한 300kN 이상의 고강도 애자에 대하여는 IEC에만 정의되어 있다. <표 부2.1>은 IEC 규격과 본 검토에 사용된 자기애자 및 유리애자의 규격을 나타낸 것이다.

표 부2.1 애자의 규격 및 제원

구 분		파괴하중 (kN)	직경 (mm)	연결길이 (mm)	표면누설거리 (mm)	비 고
IEC 규격 * IEC-305 (1978) * IEC-383 (1983)	U 210 BS	210kN	300	170	330	
	U 210 BL	210kN	320	195	370	
	U 300 B	300kN	320	195	370	
	U 400 BS	400kN	360	205	525	
	U 400 BL	400kN	380	220	550	
	U 530 BS	530kN	380	240	600	
	U 530 BL	530kN	440	255	640	
자기애자 * NGK Cat.No.14B (IEC-383)	CA-589EB	210kN	280	170	370	21톤 현수
	CA-545EB	210kN	320	170	550	21톤 내무
	CA-590EB	300kN	320	195	460	33톤 현수
	CA-855EC	300kN	400	195	690	33톤 내무
	CA-596EA	400kN	340	205	525	42톤 현수
	CA-865EA	400kN	420	205	720	42톤 내무
	CA-597EA	530kN	380	240	670	53톤 현수
유리애자 * SEDIVER	F300/195	300kN	320	195	485	33톤 현수
	F300P/195	300kN	380	195	690	33톤 내무
	F400/205	400kN	358	205	530	42톤 현수
	F530/240	530kN	380	240	620	53톤 현수

주) 1. 400kN 유리애자는 비표준품으로 주문제작임
2. 400kN의 내오손특성은 530kN와 동등함.

나. 오손지역구분

내오손 설계시에는 송전선이 통과하는 지역의 최대 오손정도를 알아야한다. 오손도는 해안으로부터의 거리에 비례하여 감소하는 경향이 있으며, 지역별 실측 결과를 기초로 오손 Map을 작성하여 사용하는 것이 바람직하다. 우리회사에서는 오손도 분석을 위하여 81년 1월부터 87년 12월까지 전국 전해안을 대상으로 측정용 Pilot 애자를 설치하여 설치지점별 오손도를 실측(“전력설비의 염진해 대책에 관한 연구”, 한전기술연구원)하였다.^[25] 적용한 오손등급 구분은 <표 부 2.2> (“송전 설계기준 1031”)이었으며, 참고로 미국 및 IEC의 오손 구분은 <표 부 2.3> 및 <표 부 2.4>와 같다.

표 부 2.2 염분부착밀도의 등급구분(한전)

구 분	한 계 치 (mg/cm ²)
청 정	~ 0.03 까지
A	0.03 초과 0.063 까지
B	0.063 초과 0.125 까지
C	0.125 초과 0.25 까지
D	0.25 초과 0.5 까지
E	0.5 초과

표 부 2.3 미국의 오손등급

구 분	한계치 (mg/cm ²)
Very Light	0.00 ~ 0.03
Light	0.03 ~ 0.06
Moderate	0.06 ~ 0.10
Heavy	0.1 이상

표 부 2.4 IEC 815의 오손 등급 구분

구 분	Salt Fog Method (kg/m ³)	Solid Layer Method	
		ESDD (mg/cm ²)	Layer Conductivity(μs)
Light	5 ~ 14	0.03 ~ 0.06	15 ~ 20
Medium	14 ~ 20	0.10 ~ 0.20	24 ~ 35
heavy	40 ~ 112	0.30 ~ 0.60	36
Very Heavy	160 이상		

<표 부2.5>는 우리나라 각 해안에 대한 오손등급별 거리를 나타낸 것이다.^[7]

표 부2.5 해안별 오손등급별 거리

해 안 오손등급	동 해 안	서 해 안	남 해 안	제 주 도
A	9 km 이상	12 km 이상	5 km 이상	8 km 이상
B	3.5 ~ 9 km	3 ~ 12 km	0.5 ~ 5 km	2 ~ 8 km
C	1 ~ 3.5 km	1 ~ 3 km	0 ~ 0.5 km	1 ~ 2 km
D	0 ~ 1 km	0 ~ 1 km		0 ~ 1 km

다. 애자의 자연오손 특성

자연조건에서의 애자의 오손특성 파악을 위하여 일본의 연해지점(태평양측 武山, 동해측 能登 및 秋田)의 폭로실험에서 얻어진 자연오손 특성을 참조하였으며, 그 내용은 다음과 같다.

(1) 급 속 오 손

태풍, 계절풍등 바다로부터의 강풍은 애자를 단시간에 오손시킨다. 이것을 급속오손이라 하며 가장 심한 오손상태가 된다.

비가 내리지 않는 경우, 급속오손시의 등가염분부착밀도는 <그림 부2.1>과 같이 해풍의 평균풍속의 3승의 시간누적치에 비례한다. 즉 애자의 등가염분부착밀도 $W(\text{mg}/\text{cm}^2)$ 와 1시간당의 평균풍속 $V(\text{m}/\text{s})$ 의 관계는 다음의 실험식으로 나타낼 수 있다.

$$W = C \cdot \sum_t V^3 \quad (\text{부2.1})$$

여기서 t : 해안으로부터의 강풍의 계속시간 (h)

C : 애자종류 및 지점에 의해 결정되는 정수

$$[(\text{mg}/\text{cm}^2)/(\text{m}/\text{s})^3 \text{ h}]$$

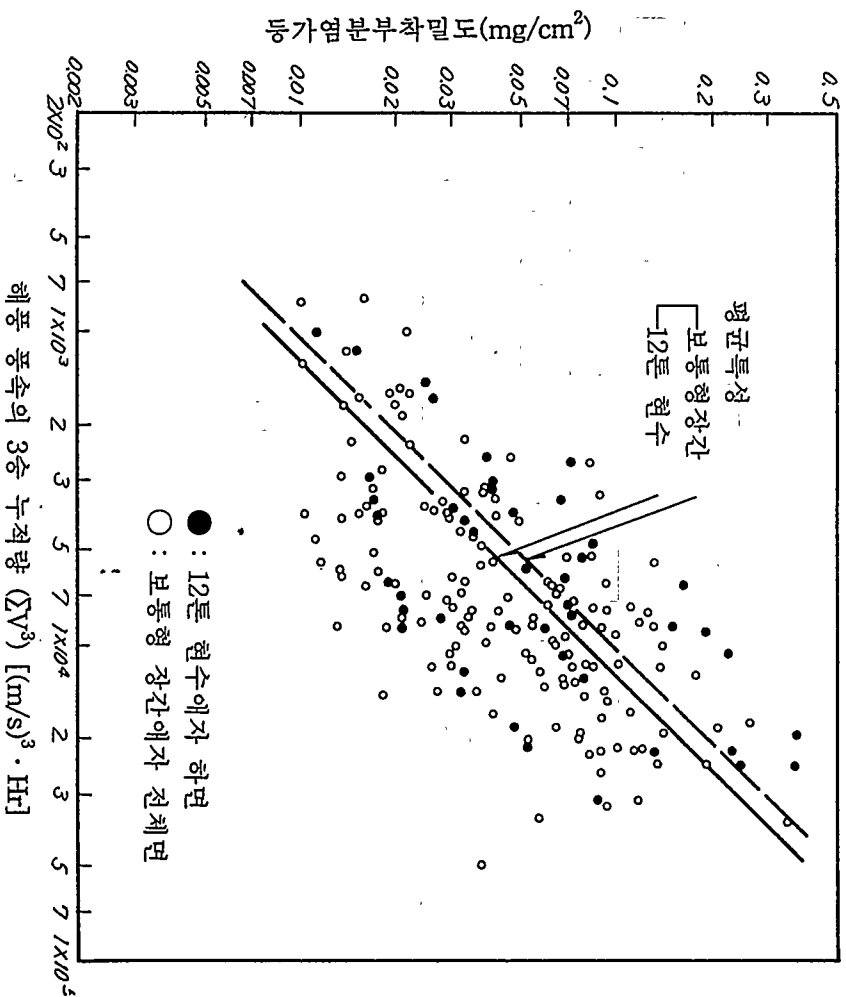


그림 부2.1 에지의 급속오손 특성

(2) 누적 오손 (정상시의 오손)

급속오손을 받은 에지는 시간이 경과함에 따라 비의 세척효과와 오손의 누적 이 반복되는데 일반적으로 급속오손시보다 작은 값으로 포화되며, 어떤 기간의 누적오손을 정상시의 오손으로 한다. 정상시 오손은 1개월, 3개월 단위로 1년간 정기측정에 의하여 추정한다. 일반적으로 정상시 오손에 급속오손이 더해진 경우에 최대 염분 부착밀도가 발생한다. <그림 부2.2>는 오손기간 1개월을 기준으로 누적오손에 의한 염분부착밀도의 비율을 나타낸 것이다.

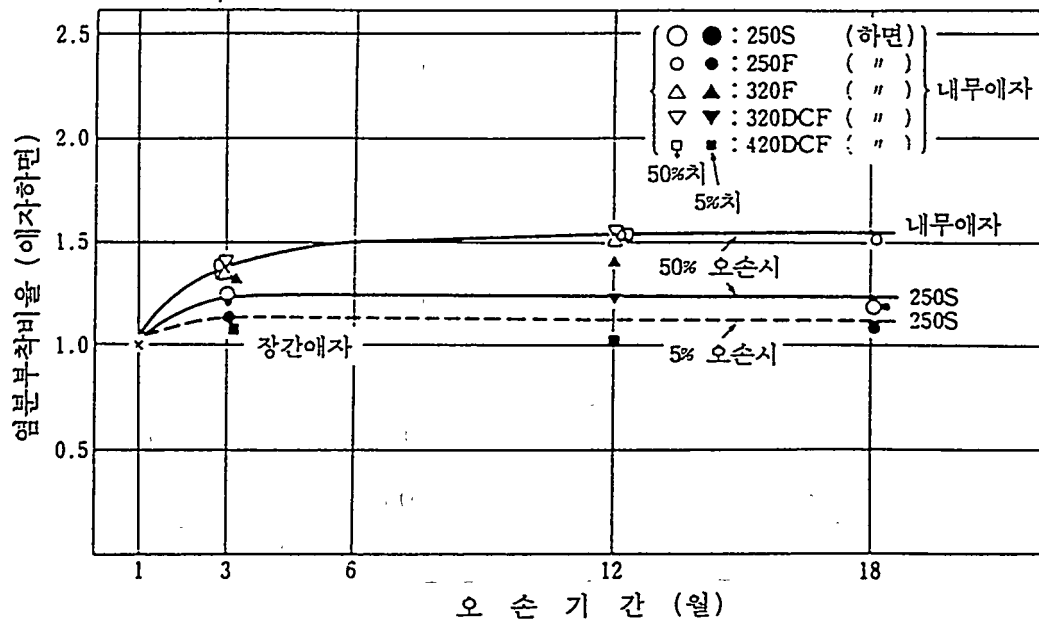


그림 부2.2 누적오손에 의한 염분부착밀도의 비율
(오손기간 1개월에 대한 비율)

(3) 기타의 오손

애자의 오손에는 해염오손 이외에도 공업지대의 매연에 의한 공업오손과 분진에 의한 진애오손, 또는 이들이 복합된 오손이 있다. 오손물의 화학성분에 따라 애자의 내전압은 다르고, 특히 석분의 성분이 많을 경우에는 등가염분부착밀도가 동일하여도 해염오손에 비하여 높은 내전압을 갖게 된다. 따라서 각 지점에서 상황을 설계에 반영시킬 필요가 있다. 애자련의 양단부를 제외하면 등가염분부착밀도는 애자련에 거의 균일하게 분포되고, 과전 상태가 등가염분부착밀도에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 생각할 수 있다.

(4) 염분부착밀도에 대한 애자의 형상효과

해안지역에서 자연조건하에 있는 애자에 부착되는 염분부착밀도는 애자 종류에 따라 다르다. <표 부2.6>은 12톤 현수애자를 기준으로 각 애자의 염분부착밀도 비율을 종합하여 나타낸 것이다. 따라서 <표 부2.6>을 염분부착밀도에 미치는 애자의 형상효과로서 생각할 수 있다.

표 부2.6 각종애자의 염분부착밀도 비교^[25]

애 자 의 종 류		급 속 오 손	평 상 오 손
12톤 현수애자	하면	1.0	1.0
21톤, 33톤 현수애자		0.8	0.8
21톤, 33톤 현수애자		0.7	1.0
12톤, 21톤, 33톤 내무애자	하면	0.7	0.8

2. 애자의 오손 섬락 특성

내오손설계를 할 때에는 사용할 애자의 오손섬락특성에 대한 검토가 필요하다. 이를 위하여는 각 애자에 대한 인공오손시험 및 자연상태에서 과전압에 노출되었을 경우의 자연오손시험이 실시되어야 한다.

가. 인공오손 시험에 의한 특성

(1) 시험 방법

인공오손시험법에는 국가별로 여러가지 방법이 있으나 IEC-507에 의하면 크게 오손선행법(Predeposit Method 또는 Solid layer Method)과 염무법(Salt Fog Method)가 있다. 또한 오손선행법은 습윤방법에 따라 크린포그법(Clean Fog Method)과 습윤법(Wet Contaminant Method)으로 구분된다.^[30]

Method)과 습윤법(Wet Contaminant Method)으로 구분된다.^[30]

<표 부2.7>은 인공오손 시험방법에 대한 분류를 나타낸 것으로서 본 검토에 서는 최근 자연조건에서의 오손애자 표면의 습윤을 가장 근사적으로 모의하는 방법으로 평가되는 정인무중법(定印霧中法)에 의한 섬락특성을 사용하였다.

표 부2.7 인공오손 시험방법의 분류^[26]

구		분	전압인가방법	비	고
오 손 선행법 (Solid Layer)	크 린 포 그 법 (Clean Fog Method)		전압선행법	습윤전에 정전압 인가 (정인무중법)	
			전압정인법	습윤후에 정전압 인가	
	습 윤 법 (Wet Contaminant Method)		전압정인법	습윤상태에서 정전압 인가	
			전압상승법	습윤상태에서 전압상승 (등가무중법)	
염 무 법 (Salt Fog Method)				습윤전에 정전압 인가	

(2) 애자의 연결길이와 내전압

내오손설계에서는 애자련의 내전압이 애자련의 연결길이에 비례하는지의 여부가 소요애자갯수를 산출하는데 매우 중요한 요소이다. 이에 대한 검토를 위하여 일본 UHV급 전압범위에 대한 애자의 연결길이와 내전압과의 관계를 조사한 결과의 예를 <그림 부2.3> 및 <그림 부2.4>에 나타내었다

내전압이 300~400kV가 되는 애자련의 길이로 부터 얻은 애자 1개당의 내전압을 기준으로 다른 길이의 애자 1개당의 내전압의 비율을 구한 결과, 대부분 0.95~1.05 의 범위에 있고, 인가한 전압의 변화폭을 5% 정도로 고려하면 그 비율은 1.0에 가깝게된다. 이렇게 하여 800kV(선간전압 1,390kV 상당)까지의 애자련의 무중내전압은 애자의 연결길이에 정비례한다는 결론을 얻었다. 이런 경향

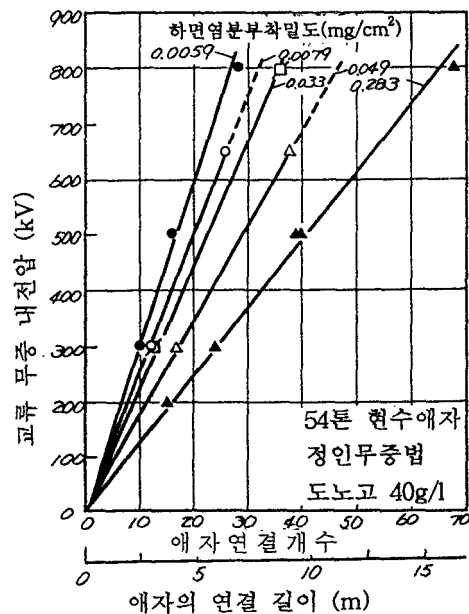


그림 부2.3 애자의 연결길이와 내전압

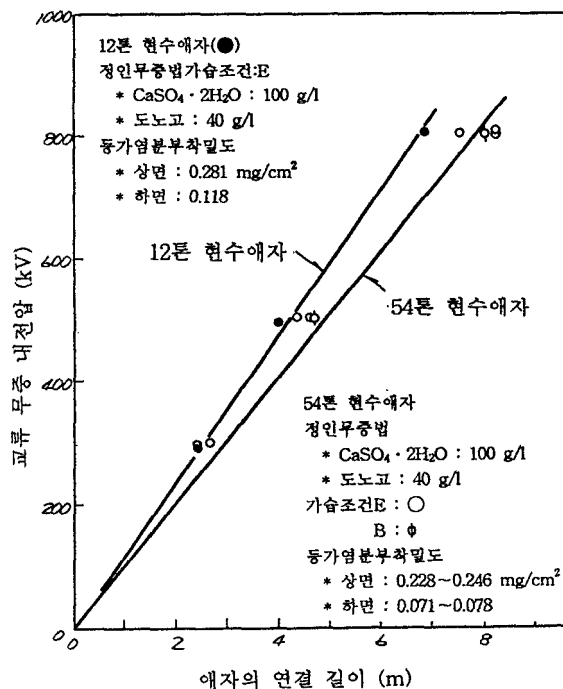


그림 부2.4 현수애자의 연결길이와 석분오손 무중내전압

은 오손염의 종류, 애자의 종류 및 오손도에 관계 없이 성립된다. 따라서 동일한 종류의 애자에서는 애자 1개당의 내전압을 이용하여 각 애자의 절연성능을 얻을 수 있다.

(3) 염분부착밀도와 내전압

<그림 부2.5>부터 <그림 부2.7>까지는 해염오손에 대한 염분부착밀도와 정인 무중내전압과의 관계를 나타낸 것이며, <그림 부2.8>은 석분오손에 대한 특성의 일례다. 석분오손내전압은 석분부착밀도가 증가하면 저하하지만 석분부착밀도가 어느 정도 이상이 되면 일정값이 되고 그 최저값은 염분부착밀도가 0.01 mg/cm² 정도일 경우의 내전압과 일치한다. 석분의 식염에 대한 함유율이 작을 경우에는 난용성물질의 석분이 섬락에 기여하지 않으므로 석분을 제외하고 염분부착밀도를 평가하고, 석분의 식염에 대한 함유율이 클 경우에는 석분을 포함한 등가염분부착밀도에서 내전압을 평가하여야 한다.

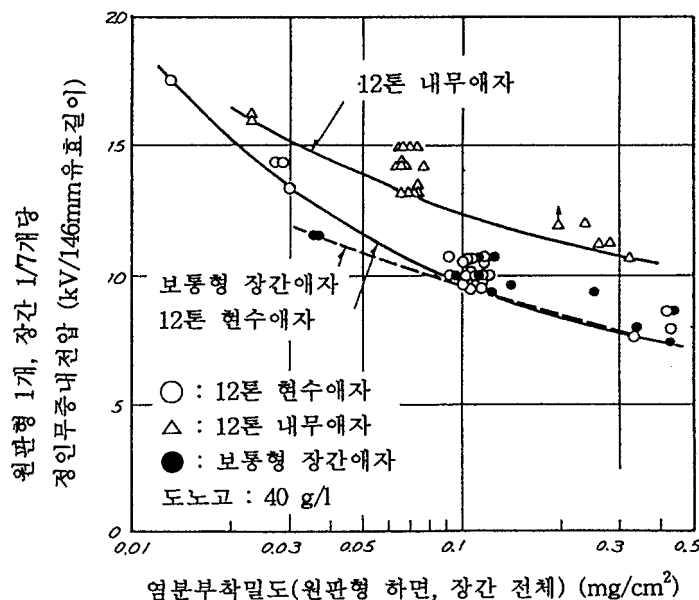


그림 부2.5 소형애자의 정인무중 내전압¹⁹⁾

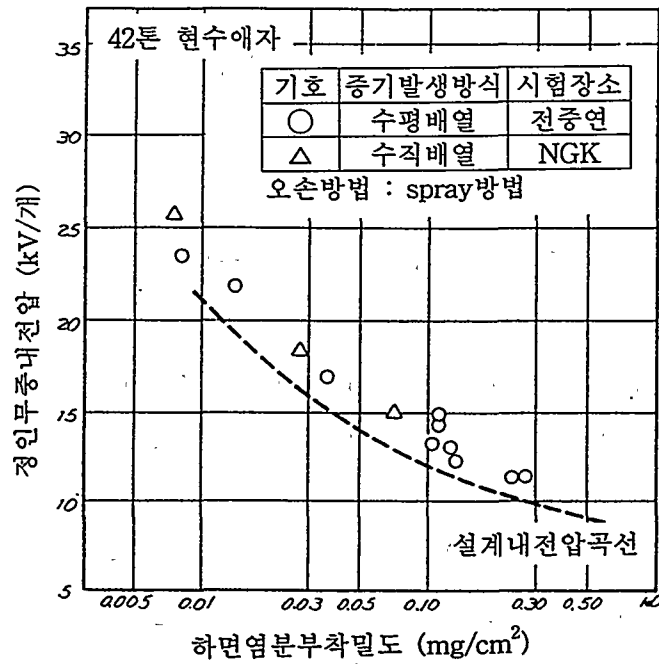


그림 부2.6 42톤 현수애자의 정인무중 내전압

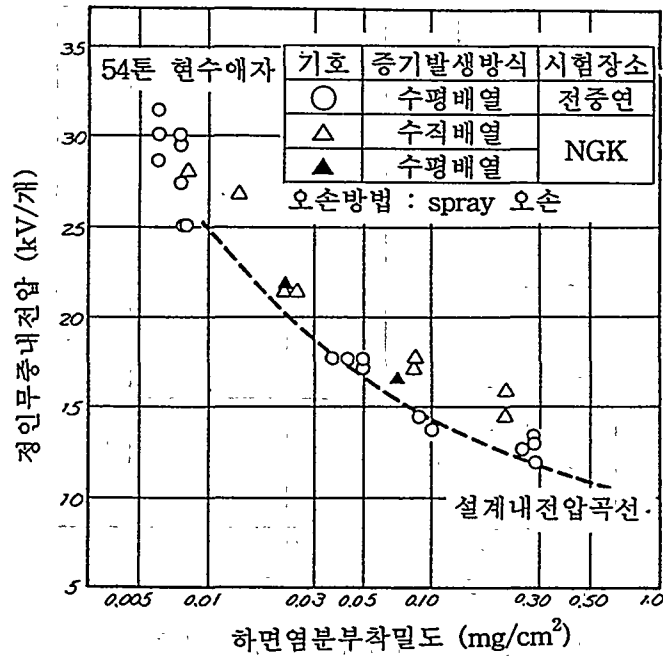


그림 부2.7 54톤 현수애자의 정인무중내전압

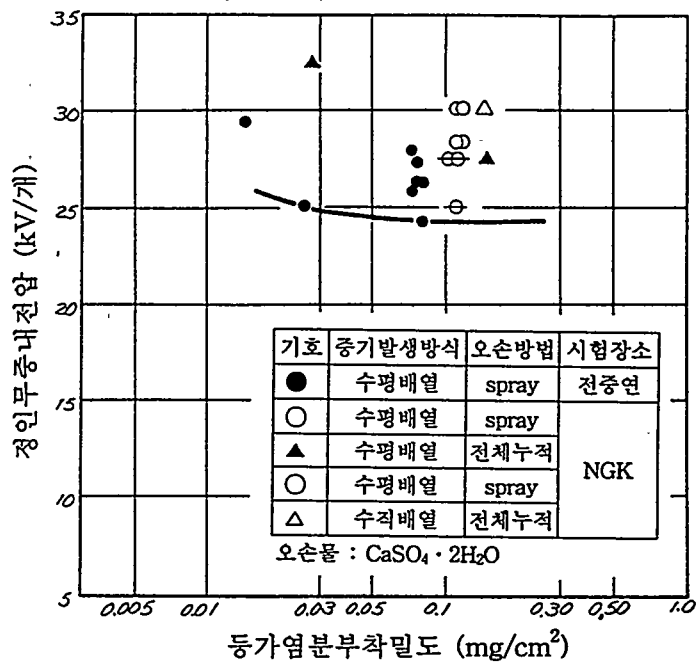


그림 부2.8 54톤 현수애자의 석분오손 내전압

나. 자연오손시험에 의한 특성

<그림 부2.9>와 <그림 부2.10>은 애자의 자연오손시험에서 얻어진 섬락전압을 인공오손에 의한 섬락전압과 비교하여 나타낸 것이다. 자연오손에 의한 섬락전압은 정인무중내전압보다 높고 이런 경향은 모든 종류의 애자에 대하여 성립한다.

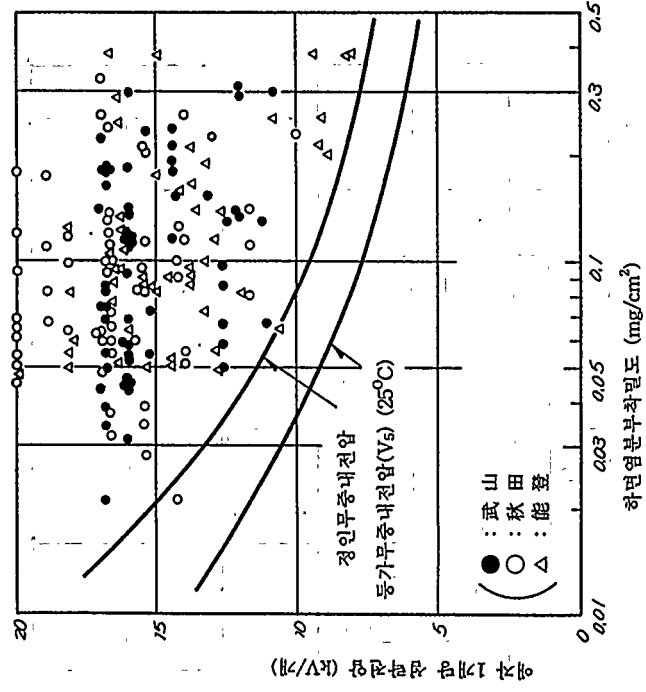


그림 부2.9 12톤현수애자의 자연오손 침략전압과 인공오손내전압

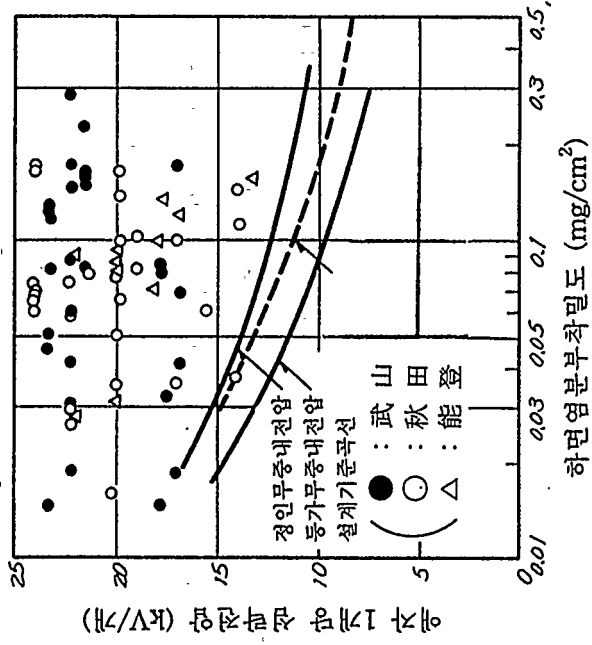


그림 부2.10 12톤내무애자의 자연 오손 침략전압과 인공오손내전압

<표 부2.8>은 동일 내염강도를 갖는 각 애자련의 연결길이 비율을 나타낸 것이다. 내무애자로 현수애자와 동일한 내염강도를 갖도록 하려면 연결길이를 약 25% 단축시킬 수 있다. 즉 같은 연결길이의 현수애자의 경우보다 약 1.3배 내전압이 향상된다.

표 부2.8 동일 내염강도를 나타내는 애자 연결길이의 비율
(12톤 현수애자기준)

애자의 종류	비 율 의 평 균 치			종 합
	武 山	秋 田	能 登	
12톤 현수	1.00	1.00	1.00	1.0
21톤 현수	0.91	0.94	0.86	
33톤 현수	0.91	0.97	0.95	
12톤 내무	0.74	0.72	0.75	0.75
21톤 내무	0.72	0.81	0.76	
33톤 내무	0.73	0.79	0.78	

다. 설계 내전압

(1) 해염 오손 설계 내전압

애자의 인공오손 및 자연오손 시험으로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다

- (가) 애자련의 오손내전압은 그 연결길이에 비례한다.
- (나) 현수애자의 경우 연결길이가 같으면 동일한 내염강도를 갖는다.
- (다) 내무애자의 경우 같은 연결길이의 현수애자보다 약 1.3배 내전압이 향상된다

이상의 결과와 Data를 이용하여 우선 12톤 현수애자의 설계기준곡선을 결정 한 다음, 내전압이 각 애자 1개당의 연결길이에 비례함을 이용하여 다른 현수애자의 설계내전압을 산출한다. 내무애자의 경우는 같은 연결길이의 현수애자 내전압을 1.3배 하여 설계내전압을 구한다. 이렇게 구한 설계내전압곡선이 <그림 부2.11>이며 <표 부2.9>는 각종 자기애자의 염분부착밀도에 대

한 설계내전압을 나타낸 것이다. 자연오손시험 결과에 의하면 정인무중법에 의한 내전압이 자연오손 내전압과의 차이가 가장 적다. 또한 검토에 사용하고자 하는 설계내전압곡선은 정인무중법에 의한 내전압과 거의 일치하므로 사용에 적합한 것으로 확인된다.

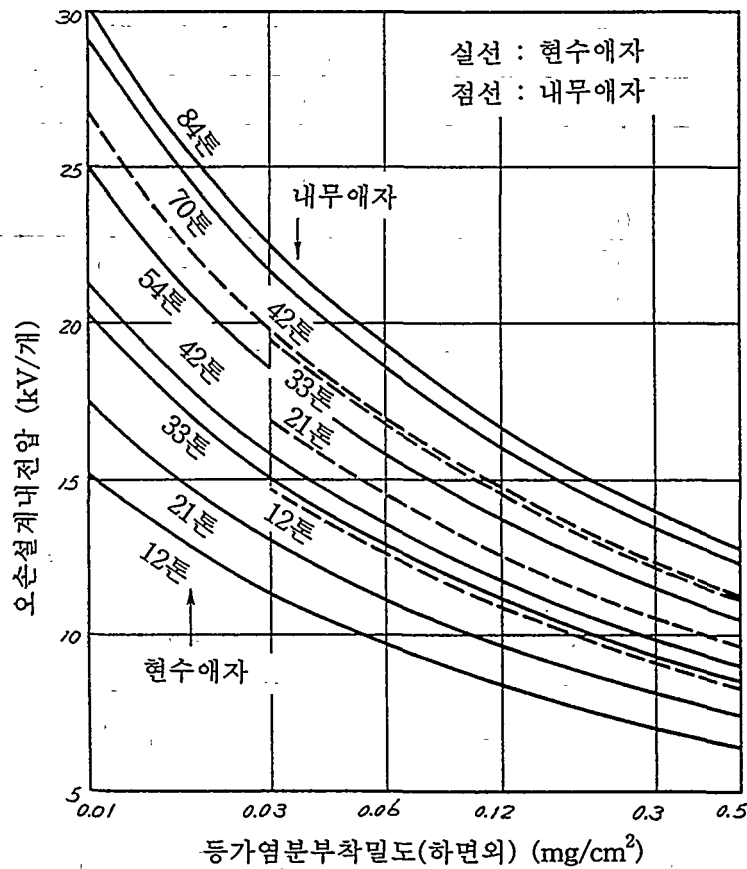


그림 부2.11 각종 자기에자의 설계내전압 곡선

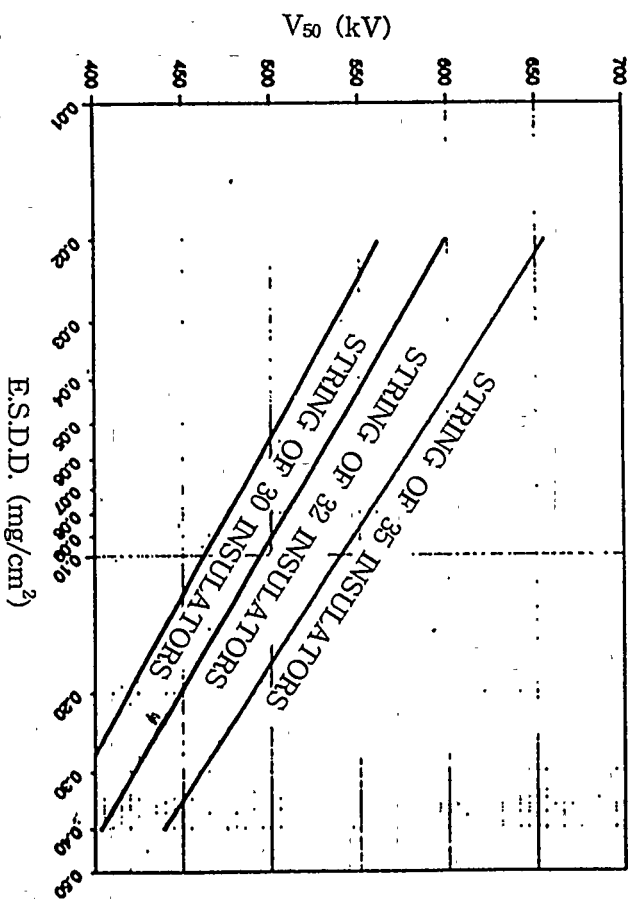


그림 부2.12 유리아재지(보통)의 V_{50} 곡선

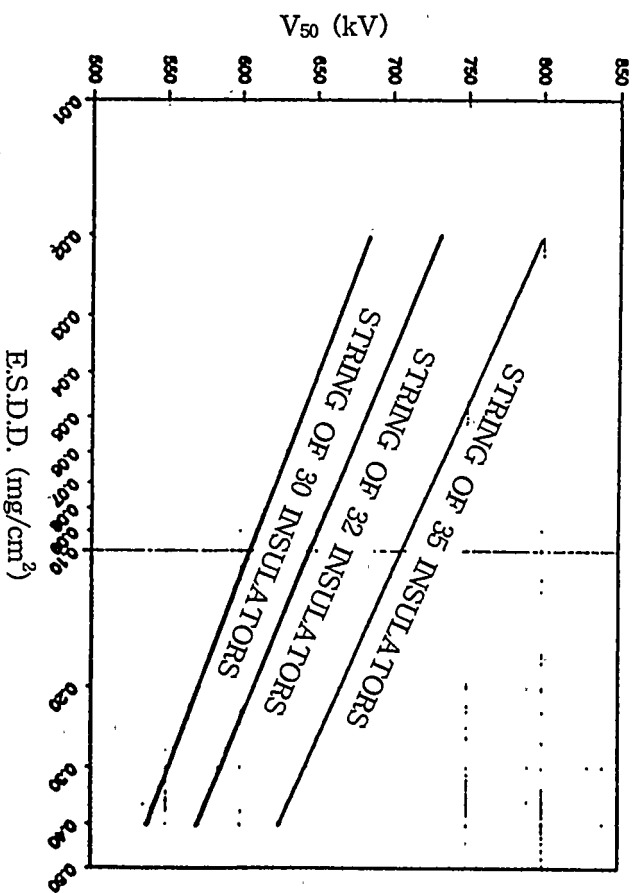


그림 부2.13 유리아재지(내무)의 V_{50} 곡선

표 부2.9 자기애자의 오손설계 내전압

애자종류	기계적 강도	애자치수		오손구분별 설계내전압 [kV/개]					
		직경 × 연결길이 [mm]	누설 거리 [mm]	0.01 mg/cm ²	0.03 mg/cm ²	0.0625 mg/cm ²	0.125 mg/cm ²	0.25 mg/cm ²	0.5 mg/cm ²
일반애자	120kN	254×146	280	14.8	11.8	9.7	8.4	7.2	6.4
	210kN	280×170	370	17.0	13.0	10.9	9.5	8.3	7.2
	300kN	320×195	460	19.5	15.0	12.6	11.0	9.6	8.4
	400kN	340×205	525	20.5	15.8	13.3	11.6	10.1	8.8
	530kN	380×240	670	24.0	18.5	15.9	13.8	11.8	10.5
내무애자	120kN	254×146	430	-	14.7	12.6	10.9	9.4	8.3
	210kN	320×170	550	-	17.0	14.3	12.5	10.8	9.5
	300kN	400×195	690	-	19.5	16.4	14.4	12.5	10.9
	400kN	420×205	718	24.6	19.8	17.0	14.7	12.6	11.2

(2) 진애오손 설계내전압

진애오손의 주성분은 석분이므로, 해염 또는 공업오손의 증착이 없는 경우, 석분오손애자의 내전압을 설계내전압으로 사용한다. 석분오손 내전압은 식염오손 설계내전압곡선의 염분부착밀도 0.01mg/cm² 정도의 내전압에 상당한 것으로 하여 구하면 그 결과를 <표 부2.9>에 함께 나타내었다

(3) 유리애자의 소요애자수량

<그림 부2.12> 및 <그림 부2.13>은 강화 유리애자의 V_{50} 특성이다. 이 특성으로부터 내전압을 산출하였으며, 이때 Withstand Probability는 유리애자 메이커에서 추천하는 값인 75%를 적용하였으며, V_{50} 의 확률분포는 정규분포를 갖는 것으로 가정하였고, 표준편차는 V_{50} 의 7.5%로 하였다. 그러므로 내전압 산출식

은 $V_w = V_{50}(1 - 0.68\sigma_s) = 0.95 V_{50}$ 이다.

단 V_{50} : 50% 섬락전압(Clean Fog법)

n : 표준편차의 배수

(=0.68 : 75%내전압확률)

σ_s : 표준편차(V_{50} 의 7.5%값)

여기서 얻어진 단위애자런길이당 내전압과 목표내전압을 비교하여 애자종류에 따른 소요애자 수량을 산출하여 <표 부2.10>에 정리하였다.

표 부2.10 유리아자의 절연설계 소요 애자수량

구 분		청정 I	청정 II	A	B	C
		0.01 mg/cm ²	0.03 mg/cm ²	0.0625 mg/cm ²	0.125 mg/cm ²	0.25 mg/cm ²
V_{50} (kV/m)	300S	102.5	91.4	84.4	77.0	70.0
	300F	126.0	115.8	109.0	102.8	96.5
	400S	107.0	95.0	87.0	81.0	72.5
	530S	"	"	"	"	"
$V_w =$ $V_{50}(1 - 0.68\sigma)$ $= 0.95 V_{50}$	300S	97.4	86.8	80.2	73.2	66.5
	300F	119.7	110.1	103.6	97.8	91.7
	400S	101.7	90.3	82.7	76.0	68.9
	530S	"	"	"	"	"
소요애자런 길 이(mm)	300S	5,698	6,394	6,920	7,582	8,346
	300F	4,637	5,041	5,357	5,681	6,052
	400S	5,457	6,146	6,711	7,303	8,055
	530S	"	"	"	"	"
소요애자수량 (목표치:555kV)	300S	30	33	36	39	43
	300F	24	26	28	29	31
	400S	27	30	33	36	40
	530S	23	26	28	31	34

* SEDIVER "DD/MJR85/94542 MKT, 1994,11.15" 참조

라. 적설 애자련의 섬락특성^[27,28]

산악지 적설지역을 통과하는 송전선로의 절연설계를 위하여, 적설시 애자련의 섬락특성에 대한 일본 米拓시험장, 石打시험장의 자연적설시험 및 日碍 초고 연구소의 인공적설시험 결과를 조사한 결과는 다음과 같다.

(1) 적설의 영향

적설지역 애자련의 교류내전압 특성은 적설길이, 적설밀도, 적설량 및 눈을 녹인 물의 도전을 등에 의해 영향을 받으며 애자의 오손상태에 의하여도 영향을 받는다.

적설길이의 비율이 커짐에 따라 교류내전압은 저하되어 100%시 최저가 되며, 70% 이상이 되면 눈의 성질에 의한 영향은 적게 된다. 또한 동일 적설비율일 경우 애자 연결길이가 1~10m 정도의 범위에서는 애자 연결길이와 내전압은 비례한다. 따라서 UHV급 송전선에서는 적설애자련에 대하여도 단위길이당 또는 애자 1개당의 설계내전압을 설정하여 사용할 수 있다.

적설량이 많으면 교류내전압은 저하되며, 애자 1개당 7~8 kg의 적설량 또는 적설높이가 20~30cm 이상이 되면 포화하는 경향이 있다. 이 양은 부착된 Horn이 충분히 덮일 만큼의 적설량이다.

적설애자련은 적설밀도와 도전에 의해 크게 영향을 받는다. <그림 부2.14>은 적설밀도와 교류내전압과의 관계를 나타낸 것이며 <그림 부2.15>는 녹인 물의 도전율과 교류내전압과의 관계를 나타낸 것이다. 모두 적설비율이 100%이고 적설높이가 20cm이상인 경우로서 도전율이 높으면 교류내전압은 낮아진다.

또한 애자가 염해에 의해 오손된 경우에는 교류내전압이 낮아지는 경향이 있으나 이에 대한 시험 Data가 충분하지 않아 본 검토에서는 적용하지 않았으며 진에오손의 경우에는 동일한 특성을 나타낸다.

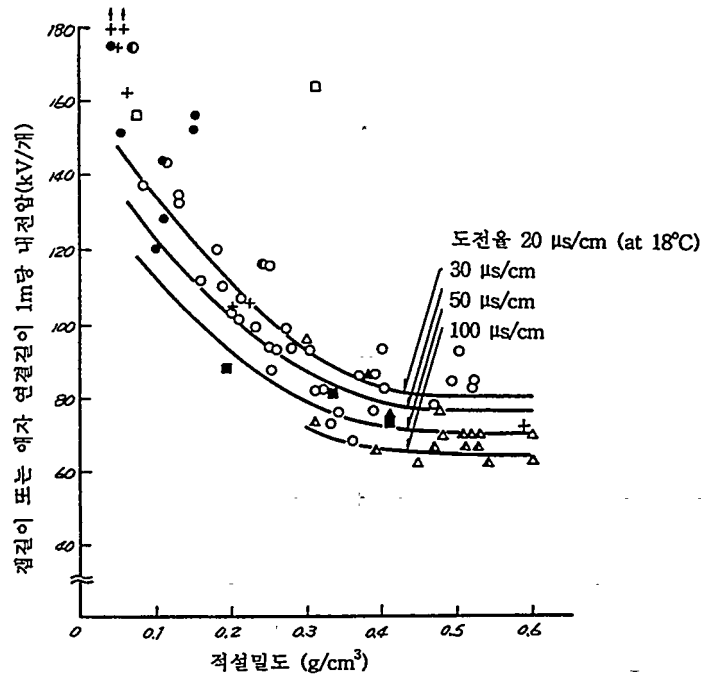


그림 부2.14 설밀도에 대한 내전압 특성

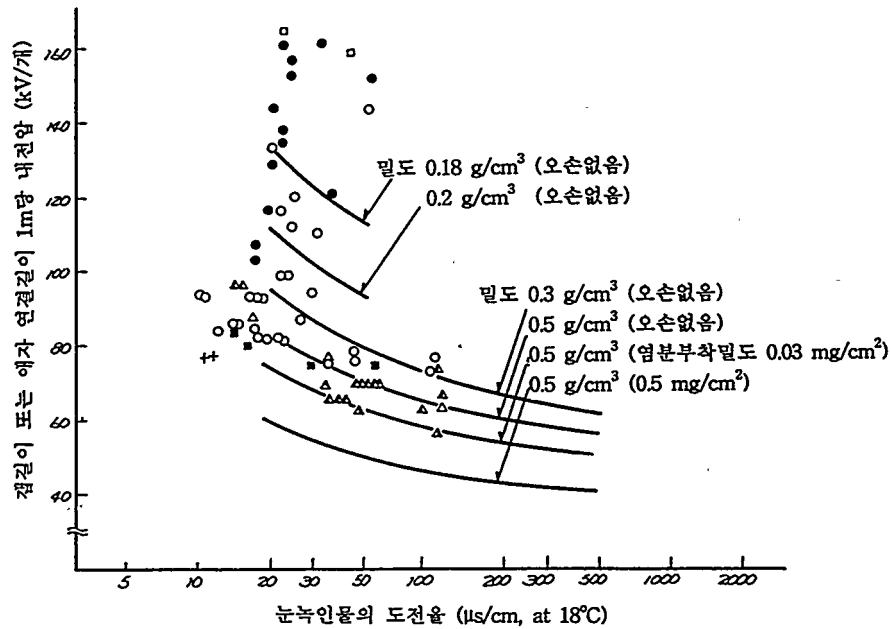


그림 부2.15 눈녹인물의 도전율에 대한 내전압 특성

(2) 적설지역 구분 및 교류내전압

적설에자런의 교류내전압은 적설밀도 및 도전율에 의한 영향을 크게 받으므로 이에 대한 구분이 필요하나 국내에는 이에 대한 측정 Data가 없으므로 일본의 1000kV 송전선로에 적용한 적설지역 구분방법을 이용하여 다음과 같이 구분하였다.

표 부2.11 적설설계 지역구분 및 교류내전압

적설지역구분	적설밀도	도 전 율	교류내전압
적 설 I	0.3 (g/cm ³)	100 (μS/cm)	71.0 (kV/m)
적 설 II	0.3 (g/cm ³)	50 (μS/cm)	78.5 (kV/m)

마. Air Gap의 교류 섬락특성^[28]

각종 Air Gap의 교류섬락특성에 대하여는 G.N.Aleksandrov, G.J. Anderson, K.Miyake등의 연구결과가 있으며, <그림 부2.16>은 CRIEPI에서 제시한 봉-봉(도체-도체), 봉-평판(도체-탑체)간의 Gap 길이와 주수상태 V_{50%}(파고치)와의 관계를 나타낸 것이다.

일본 CRIEPI에서 제시한 V_{50%}의 표시방법은 <식 부5.2>와 같다.

$$V_{50} = K \cdot 1080 \cdot \ln(0.46d+1) \quad (\text{부5.2})$$

$$\text{여기서 Gap Factor } K \begin{cases} 1.44 \text{ (도체-도체)} \\ 1.26 \text{ (도체-탑체)} \end{cases}$$

이때의 V₅₀은 IEC 방법에 의한 기상 및 표고 보정을 행한 값을 사용하였다.

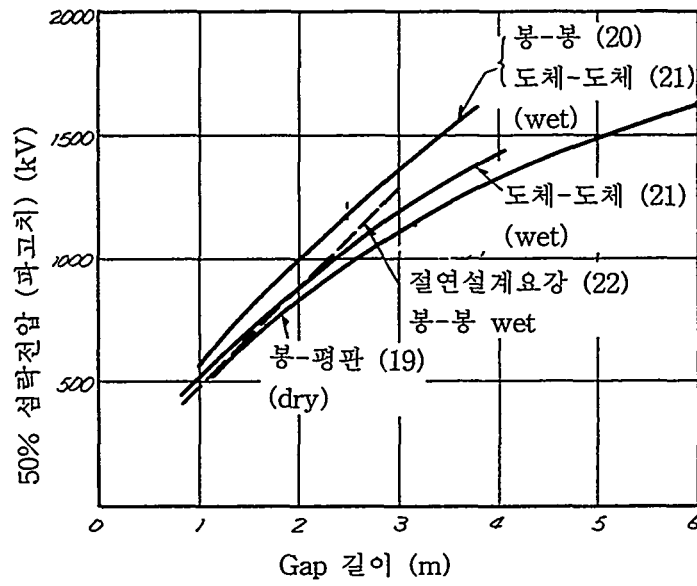
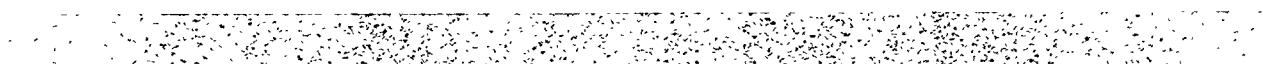


그림 부2.16 Air Gap의 교류섬락 특성^[29]



부록 3. 개폐과전압에 대한 절연설계 자료

1. 개폐과전압 섬락특성 요소

가. 파형 및 절연거리의 영향

<그림 부3.1> 및 <그림 부3.2>는 기본적인 봉-평판 Gap에 대한 파두장의 영향을 나타낸 것이다.^[28] 50% 섬락전압은 어떤 파두장에 대하여 최저값으로 되는 U특성을 갖게 되며, 그때의 파두장을 임계파두장(T_{cr})이라 하고, 이에 대응하는 50% 섬락전압을 임계 50% 섬락전압(CFO)이라 한다. 임계파두장은 Gap길이와 길어지면 커지는 경향(대략 $T_{cr}=50d$)을 나타내며, 이 관계는 Gap형상 및 습도의 영향을 받는다.^[28,31] CFO는 파의 극성, 애자련의 주수여부, 극간거리등에 따라 변화하며, 일반적으로 정극성 주수상태에서 최저값으로 된다.

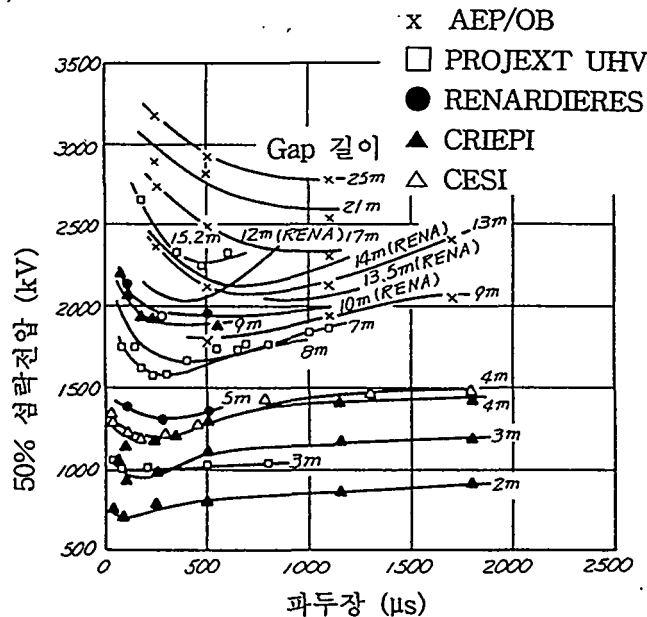


그림 부3.1 봉-평판 Gap의 50% 섬락 전압

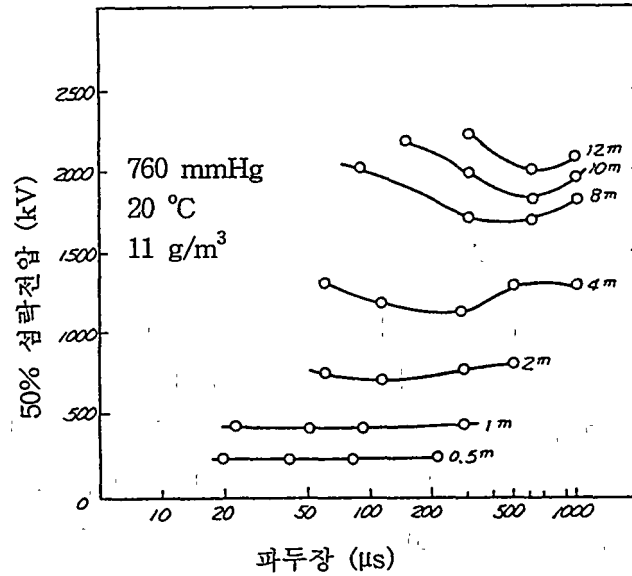


그림 부3.2 봉-평판 Gap의 50% 섬락전압-파두장 특성

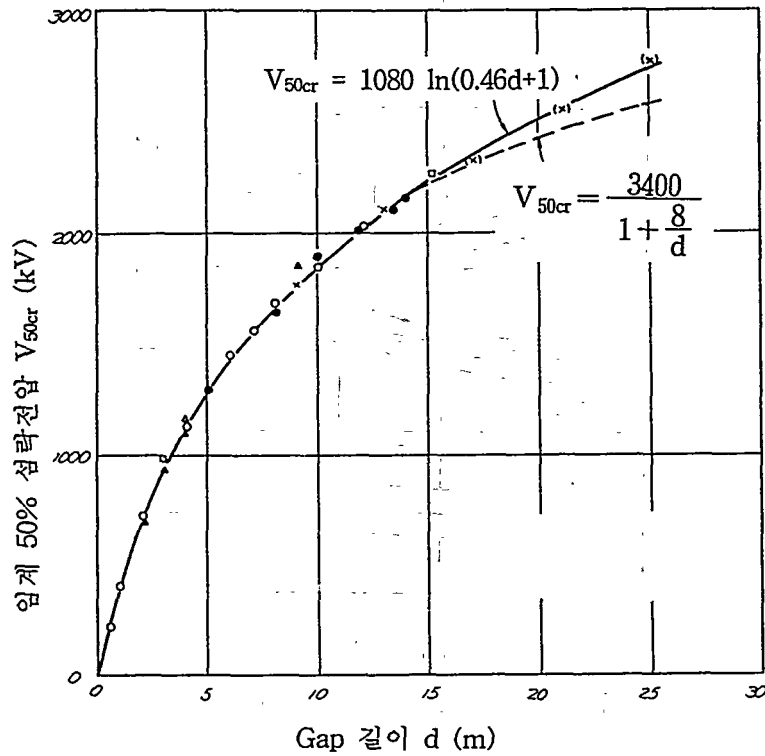


그림 부3.3 봉-평판의 Gap길이와 50% 섬락전압과의 관계

<그림 부3.3>은 봉-평판 Gap에 대하여 표준대기조건상태 때의 Gap길이 d(m)와 50% 섬락전압 V_{50cr} [kV]의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 $V_{50cr} = 3400 \cdot (1+8/d)$ 은 Gallet의 제안식이며 $V_{50cr} = 1080 \cdot \ln(0.46d+1)$ 은 일본 UHV 특별위원회의 제안식으로서 이외에도 다수의 식이 제안되고 있다.^[28,31] 봉-평판 이외의 Gap에 대하여는 공극계수(Gap factor)를 적용하여 섬락전압을 구한다.

나. 주수의 영향

주수에 의한 섬락전압의 저하는 전극의 형상 및 주수의 정도, 오염상태 등에 따라 영향을 받는다. <그림 부3.4>는 CFO에 대한 주수의 영향을 나타낸 것으로서, (애자런길이/공극거리)에 대한 건조섬락전압의 감쇄율을 T_{cr} 을 매개변수로 하여 도시한 것이다. 일반적으로 주수섬락전압은 건조섬락전압의 96~99%의 값으로 저하된다.^[31]

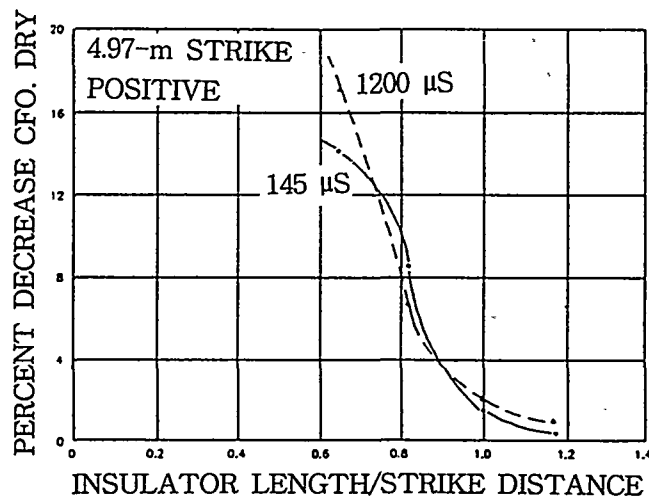


그림 부3.4 주수의 영향

다. Gap 형상의 영향

개폐과전압에 대한 섬락특성은 Gap형상의 영향을 크게 받는다. <그림 부3.5>는 지상고에 따른 봉-봉 Gap의 50% 섬락전압의 변화를 나타낸 것으로서 $H/D=0$ 의 경우에는 봉-평판의 특성을 나타내고, $H/D=\infty$ 의 경우에는 이상적인 봉-봉 Gap의 특성을 나타낸다.^[15] 또한 대지에 근접할수록 섬락전압은 Gap형상의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 따라서 개폐과전압 섬락특성은 실제의 조건에 근사한 조건에서 구해져야만 한다.

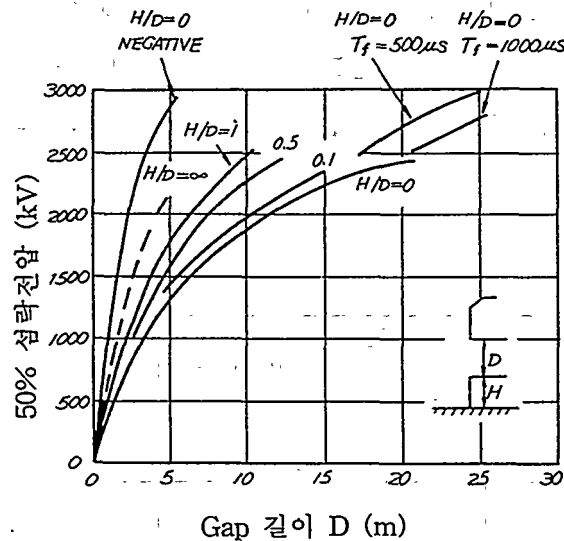


그림 부3.5 봉-봉 Gap 섬락전압의 대지 근접효과

라. 기상의 영향^[15,28,31,32]

(1) 기상 보정 계수 (K_1)

섬락전압의 표준대기상태(기압 760mmHg, 기온 20°C, 절대습도 11g/m³)로의 보정은 상대공기밀도 δ 와 습도보정계수 K_h 로부터 기상보정계수 K_1 을 구하여 행한다.

$$K_1 = (K_h / \delta)^\omega \quad (\text{부3.1})$$

여기서 ω 는 Gap 길이에 따라 정하여지는 계수(그림 부3.6)이며, K_h 및 δ 는 다음과 같은 식에 의해 구해진다.

$$\delta = 0.3855 \cdot P / (273 + t) \quad (\text{부3.2})$$

$$K_h = 1 / \{1 + K(H/\delta - 11)\} \quad (\text{부3.3})$$

여기서 P 는 기압(mmHg), t 는 기온(°C), H 는 절대습도(g/m³)를 나타낸다. K 는 정수로서 개폐 임펄스에서는 0.0083 (교류에서는 0.0119)을 사용한다.

한편 <식 부3.1>의 ω 와 <식 부3.5>의 K 에 IEC의 보정법과 다른값을 사용하는 CRIEPI 보정법이 제안되어 있다. 즉, ω 와 갭길이의 관계는 <그림 부3.6>에 병기한 바와 같이 IEC 법이 직선인 것에 비해 곡선으로 표시되어 있다. 또, K 는 정수가 아니고 <그림 부3.7>와 같이(파두장 T_f , 갭길이 d)와 갭의 형상에 따라 값이 달라진다. 이 그림에서 봉-봉, 봉-평판갭의 K 를 나타내고 있는데 실험상에 대해 어느값을 적용할 것인가는 대상 전극구조가 대칭 전극구조인가, 비대칭 구조인가에 따라 달라진다. 이상의 2가지 보정법에서 기상보정계수 K_1 에 어느정도 차이가 생기는가를 조사하기 위해 표고 1,000m 이하에 대하여 계산하여 보니 765kV급 약 5m 갭에 대해서는 봉-평판갭의 경우 1%정도 CRIEPI 보정법쪽의 K_1 값이 커진다. 일본 CRIEPI의 경우도 보정법에 따른 차이가 근소하므로 국제 규격인 IEC법에 따라 UHV를 설계 하였으며, 여기서도 IEC 보정법을 따르기로 하였다.

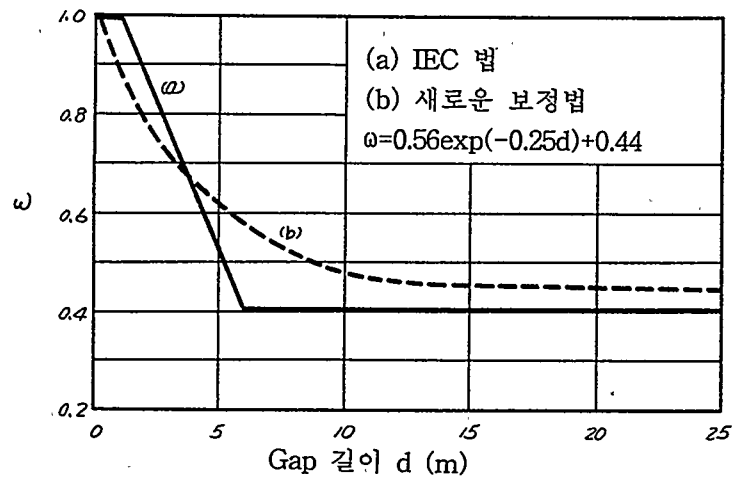


그림 부3.6 ω 와 Gap 길이와의 관계

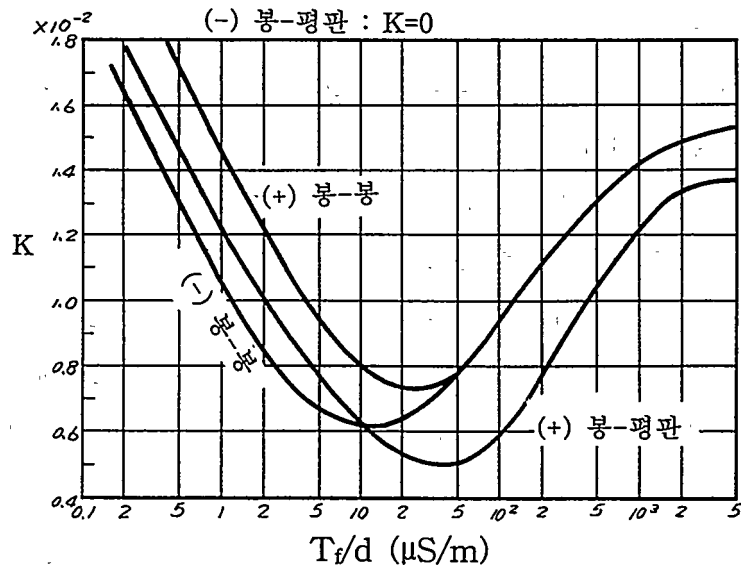


그림 부3.7 K 와 T_f/d 와의 상관관계

또한 표고가 높아짐에 따라 상대공기밀도 및 절대습도가 작아지며, 기상상태는 계절에 따라 변화하므로 고표고지점의 기상은 고유의 평균치 주변에서 통계적으로 변동하는 것으로 생각하여 다음과 같이 구한다.

(가) 표고와 상대공기밀도

라플라스 표고 공식에 의하면

$$\begin{aligned} h &= 1.84(\log P_0 - \log P)(1 + \alpha t') \\ &= 7.991(\ln P_0 - \ln P)(1 + \alpha t') \end{aligned} \quad (\text{부3.4})$$

여기서 저표고지점의 기압이 $P_0(\text{mmHg})$ 일 때 표고 $h(\text{km})$ 지점에서의 기압 $P(\text{mmHg})$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$P = P_0 \cdot \exp\left(\frac{-h}{7.991(1 + \alpha t')}\right) \quad (\text{부3.5})$$

여기서 α 는 공기팽창계수 0.00367이고, t' 는 저표고지점으로부터 $h(\text{km})$ 까지의 평균기온 ($^{\circ}\text{C}$)으로서, 높이에 따라 기온이 1km당 6.5°C 씩 저하하고 저표고지점의 기온이 $t_0(^{\circ}\text{C})$ 라 하면 $h(\text{km})$ 지점의 기온 $t(^{\circ}\text{C})$ 및 평균기온 $t'(^{\circ}\text{C})$ 는 다음과 같다.

$$t = t_0 - 6.5 \cdot h \quad (\text{부3.6})$$

$$t' = t_0 - 6.5 \cdot h/2 \quad (\text{부3.7})$$

이상에서 구한 P 와 t 및 <식 부3.2>로부터 표고 $h(\text{km})$ 지점의 평균적인 상대

공기밀도 δ_m 이 구해진다. <그림 부3.8>은 표고에 대한 기압, 상대공기밀도, 기온 등의 표준기상변화를 나타낸 것이다.

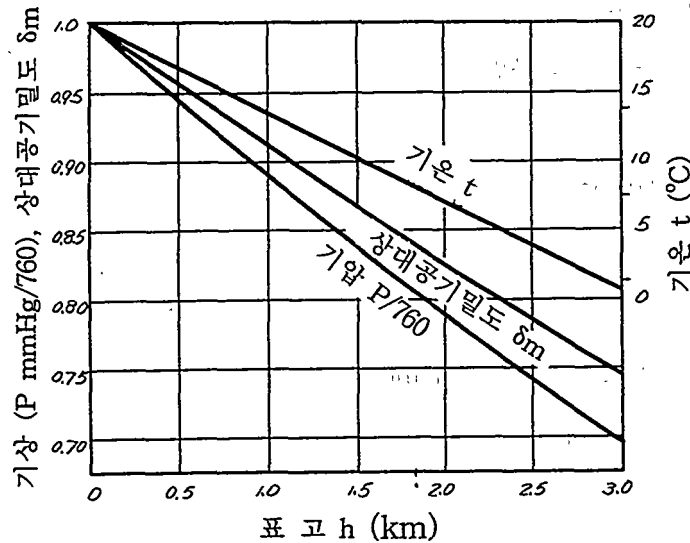


그림 부3.8 표고에 대한 기상조건변화

(나) 표고와 습도

고표고지점의 기온 $t(^{\circ}\text{C})$ 에 대한 포화수증기압을 $V_t(\text{mmHg})$, 상대습도를 $b(\%)$ 라 하면 절대습도 H 는 다음식으로 구해진다.

$$H = \frac{289 \cdot V_t}{273 + t} \times b \quad (\text{부3.8})$$

여기서 표준상태의 상대습도 $b=65\%$ 이다. 이상에서 구한 H 와 δ_m 및 <식 부 3.3>으로부터 평균적인 습도보정계수 K_{hm} 이 구해지며, (K_h/δ) 의 평균치를 (K_{hm}/δ_m) 으로 한다.

(다) 통계적 변동을 고려한 기상보정계수

고표고지점 및 저표고지점에서 연간 상대공기밀도 및 절대습도를 관측하여 (K_h/δ) 의 통계적 변동을 고려한 결과 일정지점에서 (K_h/δ) 의 표준편차는 개폐 임펄스의 경우 0.03, 교류의 경우 0.05 정도로 생각할 수 있으며^[9], 기상보정계수는 이와같은 통계적 변동을 고려하여 다음과 같은 식으로 구한다.

$$\text{개폐 임펄스에 대하여 } (K_h/\delta) = (K_{hm}/\delta_m) + 0.03$$

$$\text{교류에 대하여 } (K_h/\delta) = (K_{hm}/\delta_m) + 0.05 \quad (\text{부3.9})$$

(2) 내압계수 (k_2)

내압계수는 절연의 최소내전압의 임계섬락전압에 대한 비를 나타내는 것으로서 다음식에 의하여 산출한다.

$$K_2 = \frac{1}{1 - m\sigma} \quad (\text{부3.10})$$

여기서 섬락전압의 표준편차 σ 는 개폐 임펄스에 대하여는 0.05, 교류에 대하여는 0.03이다. 또한 m 은 개폐 임펄스 및 교류에 대하여 3을 적용한다.

2. 대지간 개폐과전압 섬락 특성

섬락특성에 관한 시험자료는 이탈리아의 CESI 및 일본의 CRIEPI 등 외국에서 각종 전극형상에 대한 시험을 거쳐, 50% 섬락전압과 섬락거리와의 관계 및 공극계수를 제안하였다. 다음의 <표 부3.1>은 이를 요약한 것이다.

표 부3.1 대지간 '섬락특성'

제 안 자	50%섬락전압 (CFO)	공극계수(k)	비 고
Paris et. al (ELECTRA ,1973)	$500 \cdot k \cdot d^{0.6}$	1.0 ~ 1.9 (정수)	Hileman; "Insulation coordination"
IEC (IEC, 1976)	$3,450 \cdot k / (1+8/d)$	섬락거리(d)의 변수	
Pigni et. al (1979)	$k \cdot \{1,400 + (55 \cdot d)\}$	-	
Gallet,Thione (ELECTRA, 1984)	$3,400 \cdot k / (1+8/d)$	섬락거리(d)의 변수	
CRIEPI (1985)	$1,080 \cdot k \cdot \ln(0.46d+1)$	혼간격과 최단섬락 거리의 비의 변수	CRIEPI, UHV 실증시험위원회

표의 각 섬락특성식중에서 CRIEPI를 제외한 대부분은 문형철탑, 우두형철탑 등의 Tower Window 내의 V형 애자장치를 기준으로 시험한 결과이다. CRIEPI 제안식은 4각철탑, 수직도체배열 상태에서 현수, 내장 및 V형 애자장치에 관하여 50cm~30m 정도의 넓은 영역의 섬락거리에 걸쳐서 시험한 결과로서 다른 제안식들의 결과와도 잘 일치하고 있다. 그러므로 본 검토에서는 개폐과전압의 섬락특성이 전극형상등에 민감함을 고려하여 우리회사 765kV 철탑과 가장 유사한 구조를 갖는 일본 CRIEPI의 제안식을 사용하였다.

가. 현 수 장 치^[9,28]

<그림 부3.9>는 현수장치의 Gap 길이에 대한 각 경로별 섬락특성을 나타낸 것이다. CRIEPI에서 시험에 사용한 도체는 단면적 810mm², 소도체간격 500mm의 8도체이다. 또한 탑체폭은 8.6m이고, 하단암의 형상은 선단폭이 2m인 3각형상과 4각형상의 2종류이다. 애자장치의 횡진각은 20°이고, Gap길이는 각 경로의 최단

거리를 나타낸다. 현수장치에서는 하단암의 형상이 3각 또는 4각인 경우 큰 차이가 없었으며, 또한 도체의 카테나리각을 20°~40° 정도로 변화시켜도 섬락전압은 변화하지 않았다.

<그림 부3.10>은 현수예자장치 Horn의 섬락특성을 나타낸 것이다. 이 경우 섬락경로는 직접 상단암으로 섬락하는 경우와 Horn간으로 섬락하는 경우가 있지만, 양자의 특성을 별도로 구하는 것은 불가능하므로 도체측 Horn끝 ~ 상단암의 간격 D와 Horn간격 d의 비(D/d)의 함수로써 표현하였으며, 이것을 수식화하면 다음과 같다.

$$k = 1.68 \cdot \exp\left(\frac{-0.34}{D/d}\right) \quad (\text{부3.11})$$

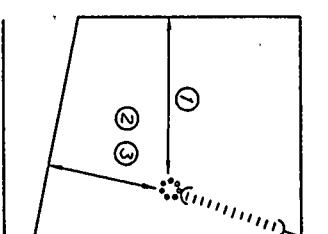
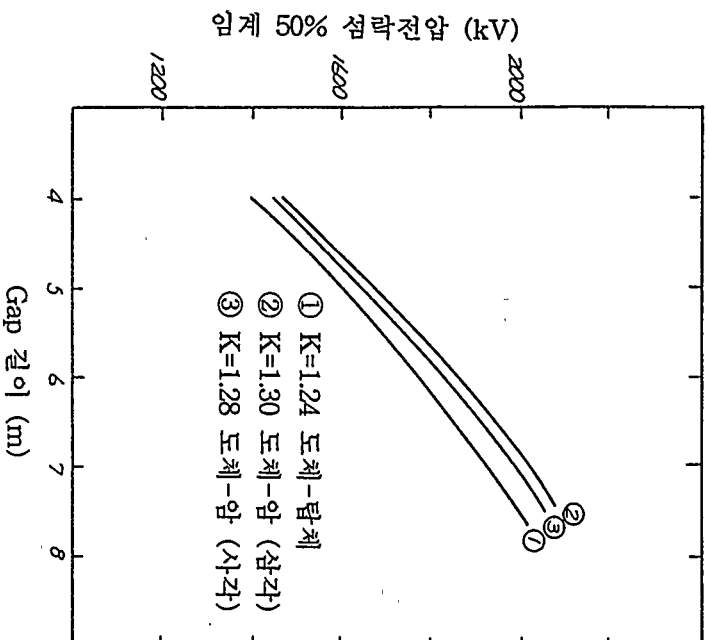


그림 부3.9 현수예자 장치의 Gap 특성

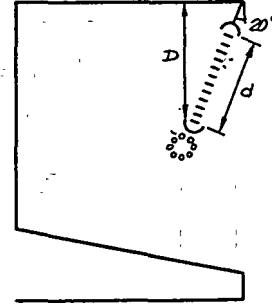
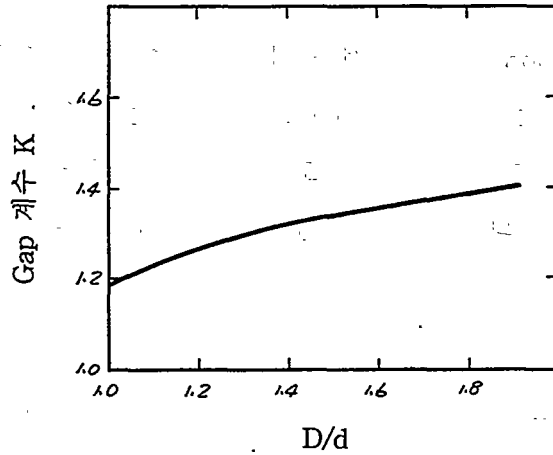


그림 부3.10 현수애자 장치 Horn의 섬락특성

나. 내 장 장 치^[9,28]

내장에자장치의 경우, 섬락경로는 애자련상의 혼간 또는 Corona shield ring과 상부혼간 및 Jumper 도체 또는 Jumper내 혼과 상부Arm간이 있다. 섬락경로를 Jumper내 혼과 상부Arm간으로 유도할 경우 섬락특성은 Jumper 형상의 영향을 받는다. <그림 부3.11> 및 <그림 부3.12>는 8도체 Jumper(810mm, 소도체간격 500mm)와 Pipe형 Jumper(φ 250mm, 간격 600mm, 수평배치)에 대하여 시험한 결과를 나타낸 것이다.

시험에서 탑체폭은 8.6m, Arm 끝단의 폭은 2m로 하였으며, Arm의 형상은 3각과 4각에 대하여 시험하였다. 또한 Jumper의 위치는 수평각과 횡진을 고려하여 Arm 끝단으로부터 4~5m 탑체측으로 들어온 위치로 하였다. 시험결과 Pipe Jumper의 경우가 8도체 Jumper의 경우보다 낮은 특성을 보였다.

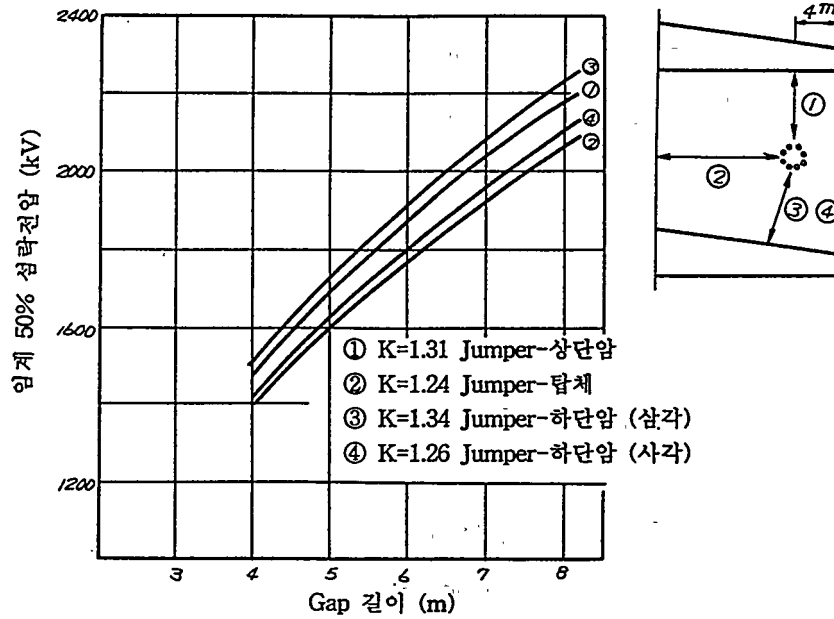


그림 부3.11 8도체 Jumper의 Gap 특성

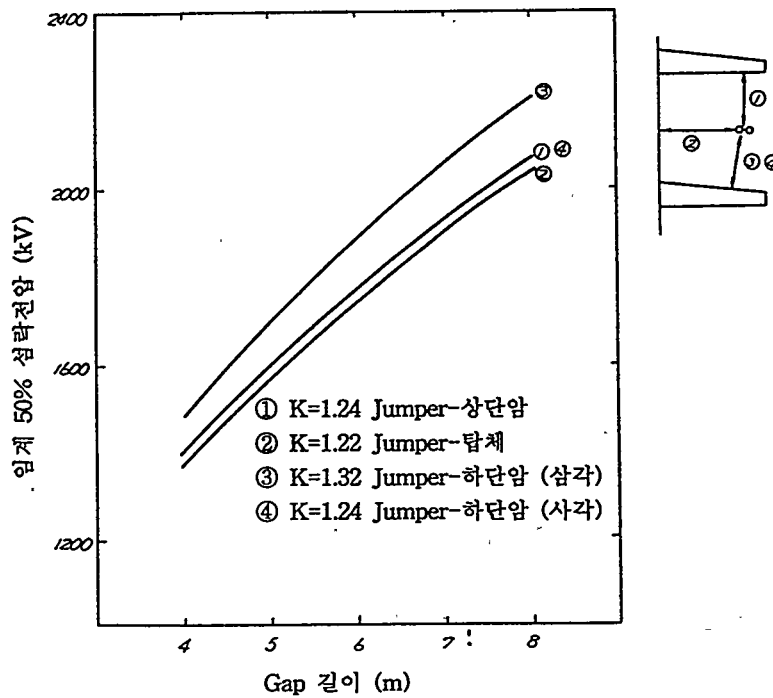


그림 부3.12 Pipe Jumper의 Gap 특성

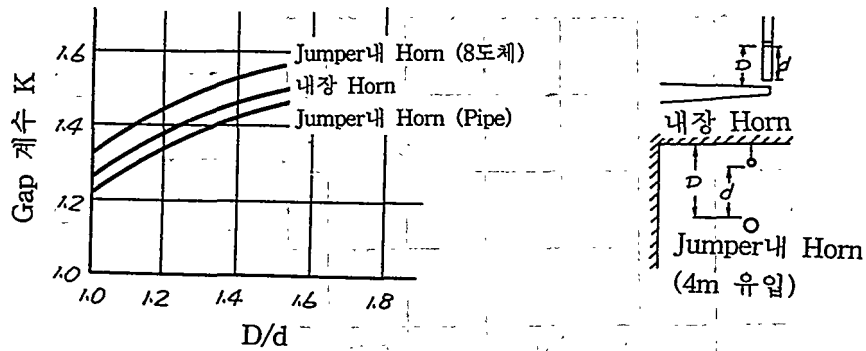


그림 부3.13 내장애자장치 Horn의 섬락특성

<그림 부3.13>은 내장애자장치의 Horn 및 Jumper Horn의 섬락특성을 나타낸 것으로서, 현수장치의 경우와 같이 Horn ~ 지지Arm간 간격 D와 Horn간격 d의 비 D/d로 규격화하여 나타내었다. 각각의 특성에 대하여 수식화하면 다음식과 같다

$$\circ \text{내장 Horn : } k = 2.17 \cdot \exp\left(\frac{-0.54}{D/d}\right) \quad (\text{부3.12})$$

$$\circ \text{8도체 Jumper Horn : } k = 2.25 \cdot \exp\left(\frac{-0.54}{D/d}\right) \quad (\text{부3.13})$$

$$\circ \text{Pipe Jumper Horn : } k = 2.12 \cdot \exp\left(\frac{-0.54}{D/d}\right) \quad (\text{부3.14})$$

다. V런 Jumper 지지장치[9,28]

<그림 부3.14>는 V런 Jumper지지장치의 시험결과를 나타낸 것이다. 도체구성

은 810mm, 8도체, 소도체간격은 500mm이다. 탑체폭은 8.6m, Arm폭은 2m 및 7m의 2종류에 관하여 시험하였으며, <그림 부3.14>에서 보듯이 Arm폭의 영향은 큰 것으로 나타났다.

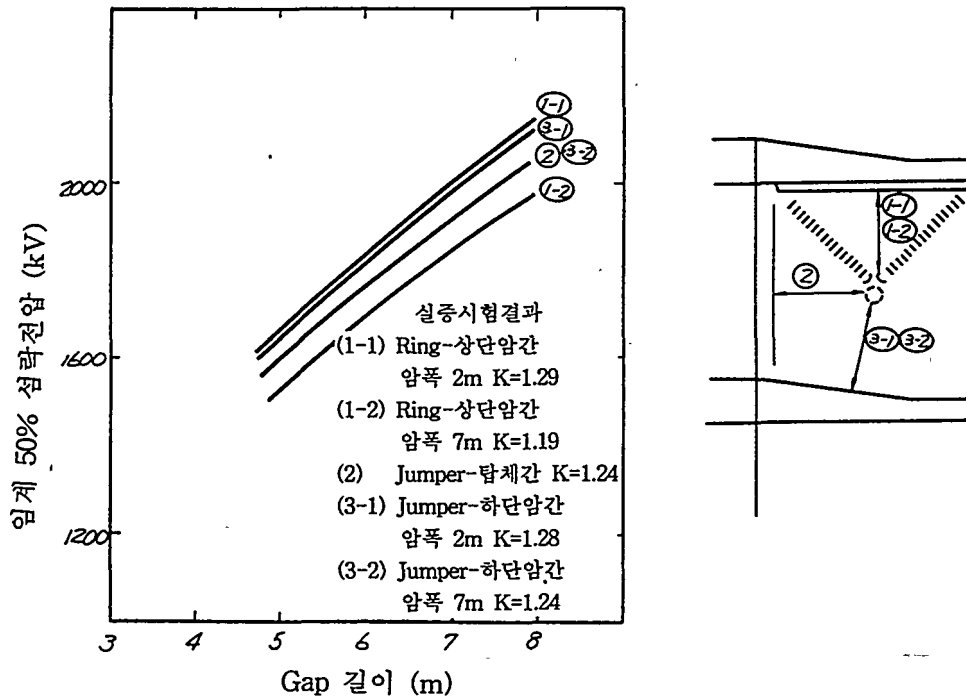


그림 부3.14 V런 Jumper 지지장치의 섬락특성

<그림 부3.15>는 Tower Window 내 Jumper지지장치의 섬락특성을 나타낸 것이며, <그림 부3.16>은 V런내 혼의 섬락특성을 나타낸 것이다. 섬락특성은 과전측 ring과 상단Arm 간격 D와 혼간격 d의 비 D/d 로 규격화 하였다. 이들의 특성을 수식화하면 다음과 같다.

○ 외측상 Arm폭 2m: $k = 2.22 \cdot \exp\left(\frac{-0.54}{D/d}\right)$ (부3.15)

○ 외측상 Arm폭 7m: $k = 2.04 \cdot \exp\left(\frac{-0.54}{D/d}\right)$ (부3.16)

○ Window내 탑체폭 7m: $k = 1.97 \cdot \exp\left(\frac{-0.54}{D/d}\right)$ (부3.17)

V런 개각의 영향은 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

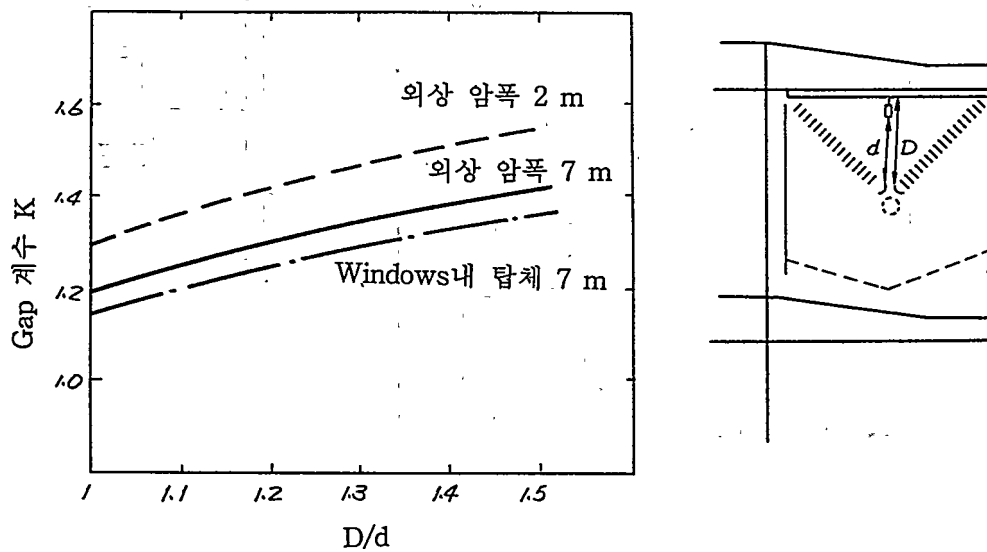


그림 부3.15 V런 Jumper 지지장치 내 혼의 섬락특성

라. V런 현수장치^[9,28]

<그림 부3.16>은 Tower Window내 V런 현수장치의 섬락특성을 보인 것이다. 도체는 전향과 같으며, 탑체폭은 4m 및 7m의 2종류에 관하여 시험하였다. 직조 현수장치에 비하면 섬락전압은 약간 저하하는 경향을 보였다.

<그림 부3.17>은 Tower Window내 V런 도체의 cartenary각의 영향을 나타

낸 것이며, <그림 부3.18>은 Tower Window내 V런 중앙에 설치한 혼 Gap의 섬락특성을 보인 것이다. 섬락특성은 과전측 ring과 상단Arm간의 간격 D와 혼 간격 d의 비 D/d로 나타내었으며, 수식화 하면 다음과 같다.

$$\circ V\text{런 현수장치: } k = 1.89 \cdot \exp\left(\frac{-0.54}{D/d}\right) \quad (\text{부3.18})$$

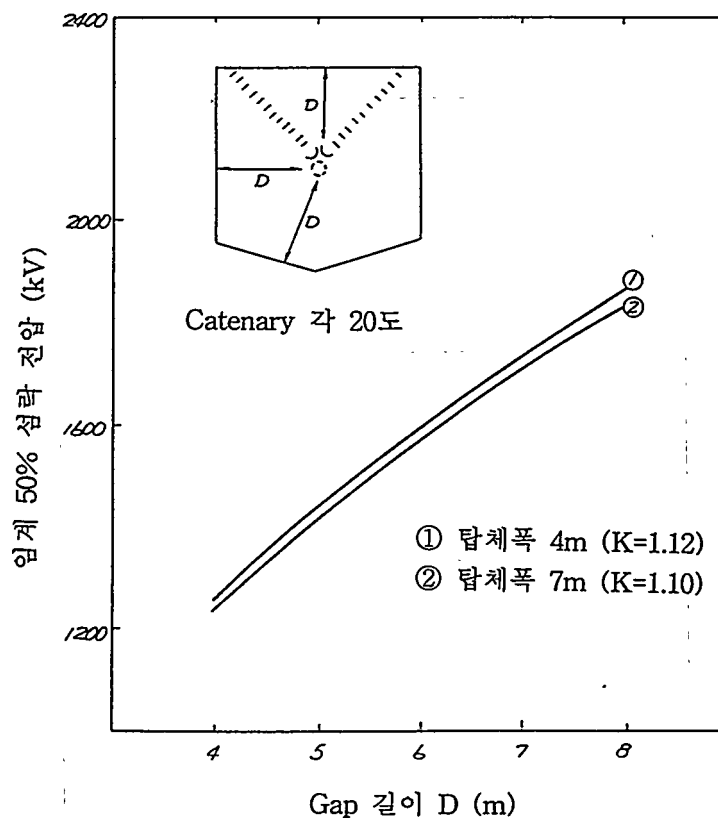


그림 부3.16 Tower Window내 V런 현수장치의 섬락특성

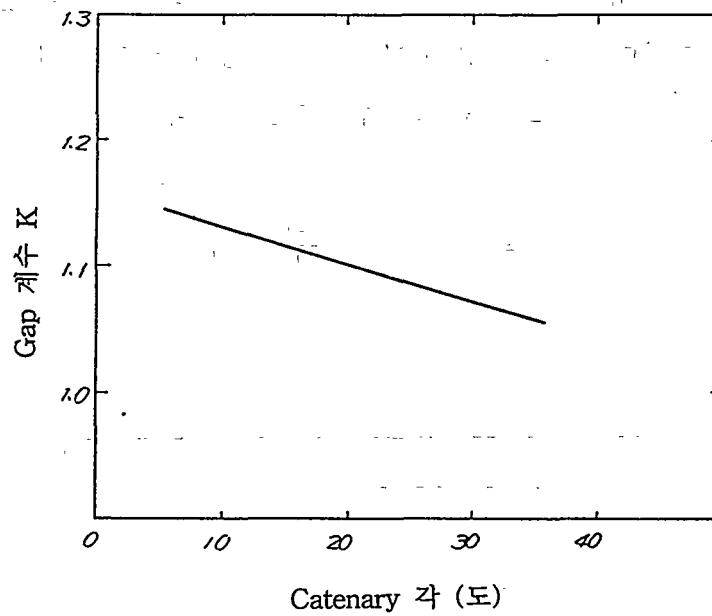


그림 부3.17 Tower Window내 V런 현수장치의 섬락전압에 주는 Catenary 각의 영향

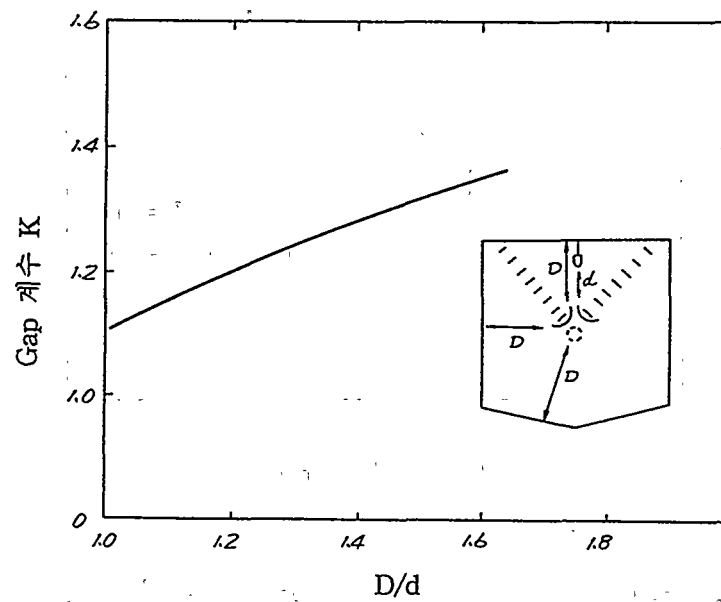


그림 부3.18 Tower Window내 V런 현수장치 내흔의 섬락특성

마. 변전소 인입구^[9,28]

<그림 부3.19>는 인류애자장치 및 GIS용 Bushing Shield Ring~지지물간을 모의하여 Ring~탑체간의 섬락특성을 나타낸 것이다. 인류애자선에 대한 인하선의 구성은 인류점으로부터 Jumper를 따라 지지물까지 도달한 다음 인하하는 경우(그림중 A)와 인류점에서 직접 인하하는 경우(그림중 B)의 2종류에 대하여 시험을 실시하였으며, 후자의 경우에 섬락전압이 낮아지는 것으로 나타났다. Corona Shield Ring~탑체간 섬락전압은 중간값의 특성을 갖는 B의 경우가 근사치이다.

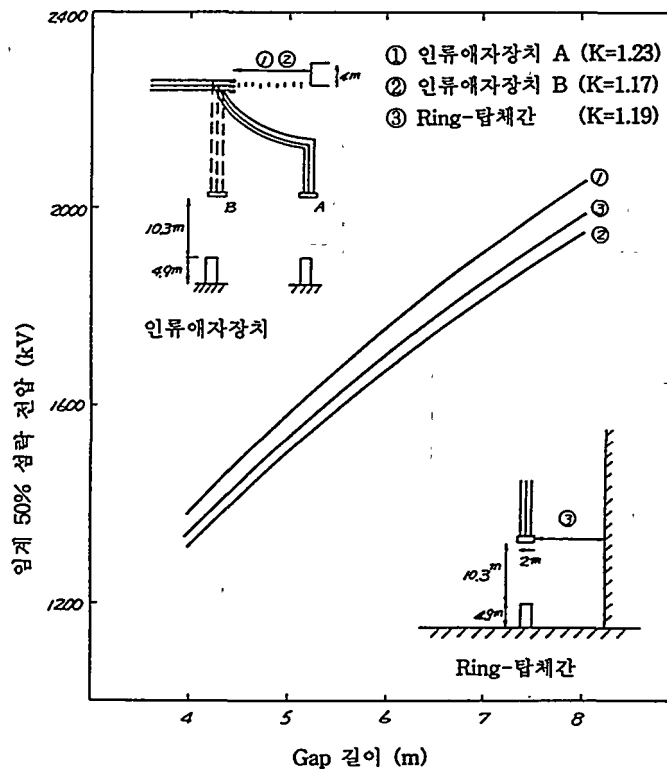
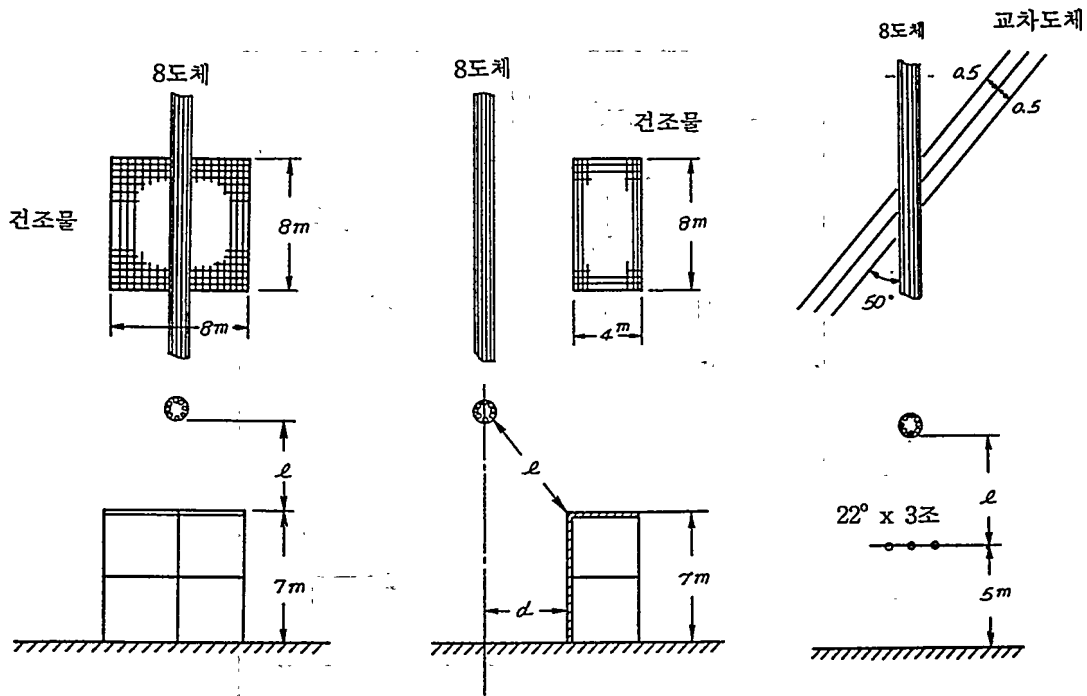


그림 부3.19 변전소 인입구에서의 섬락특성

바. 타 공작물^[9,28]

<그림 부3.20>은 도체~건조물간 및 도체~도체간의 섬락특성 검토시험을 나타낸 것이다. 건조물은 직경 5cm의 Pipe로 이루어져 있으며, 섬락되는 상면 및 측면은 금속망으로 되어 있다. 또한 교차되는 도체는 지상 5m에 AI 단도체를 3조 배선하고 말단을 접지하였다. 시험에서는 여러 파두장의 개폐 임펄스전압을 인가하여 각각의 50%섬락전압을 구하였다.



(a) 도체-건조물간(직하) (b) 도체-건조물간(경사) (c) 도체-도체간

그림 부3.20 타 공작물과의 섬락특성 검토 시험

<그림 부3.21>은 Gap길이의와 임계 50% 섬락전압의 관계를 봉-평판 Gap길이
의 특성과 비교한 것으로서, 근접물이 도체와 같이 면적이 작은 경우에 섬락전
압이 높게 나타났다. 그러나 Gap 길이가 길면 대지의 영향이 생겨 섬락전압이
포화하는 경향이 현저하게 나타난다. 그러므로 도체~대지간의 특성으로 타공작
물과의 이격거리를 고려하면 안전하게 된다.

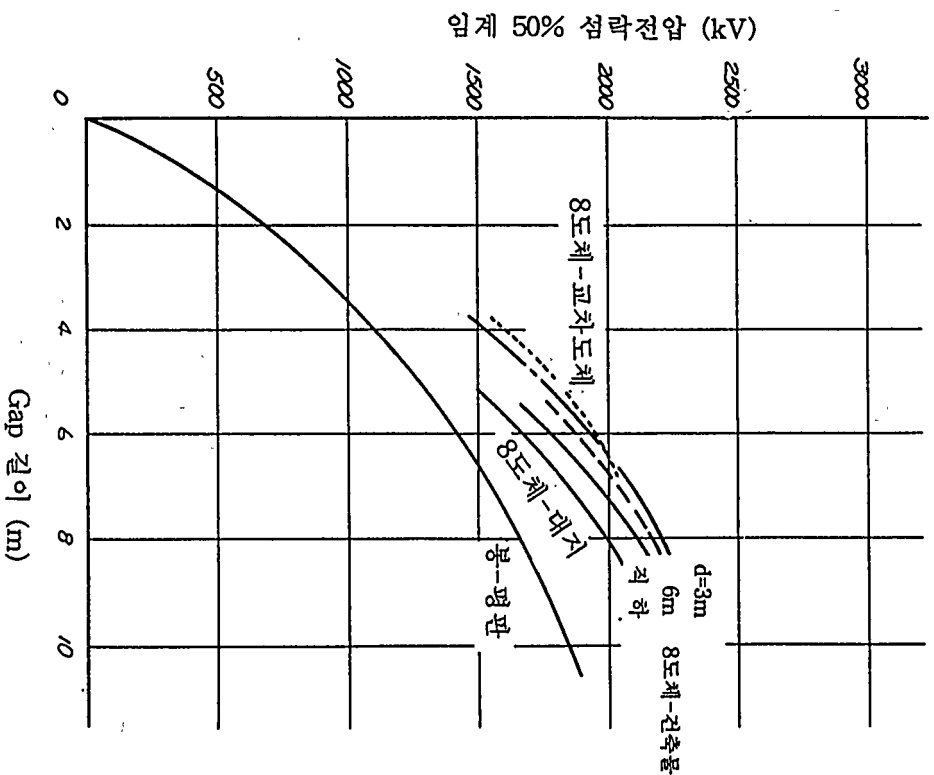


그림 3.21 도체와 타 공작물과의 근접시 섬락특성

3. 상간 개폐과전압 섬락 특성

가. 상간 섬락특성 파라미터^[28]

(1) 상간 개폐 임펄스 파형

개폐과전압에 대한 섬락은 섬락거리에 관계되므로 대지간은 물론 상간에도 발생할수 있다. 상간섬락의 경우, 대지간 섬락특성 관련요소 이외에도 한 상도체의 부극성파에 대한 다른 상도체의 정극성파의 크기 및 각 파의 최대치가 발생하는 시간의 차에도 영향을 받는다. 이러한 상간 개폐 임펄스는 <그림 부3.22>와 같이 고저차가 현저한 산악지의 상간 Clearance를 정하는데 매우 중요하다. <그림 부3.23>은 상간 개폐임펄스 시험시의 파형 및 Parameter를 나타낸 것이다.

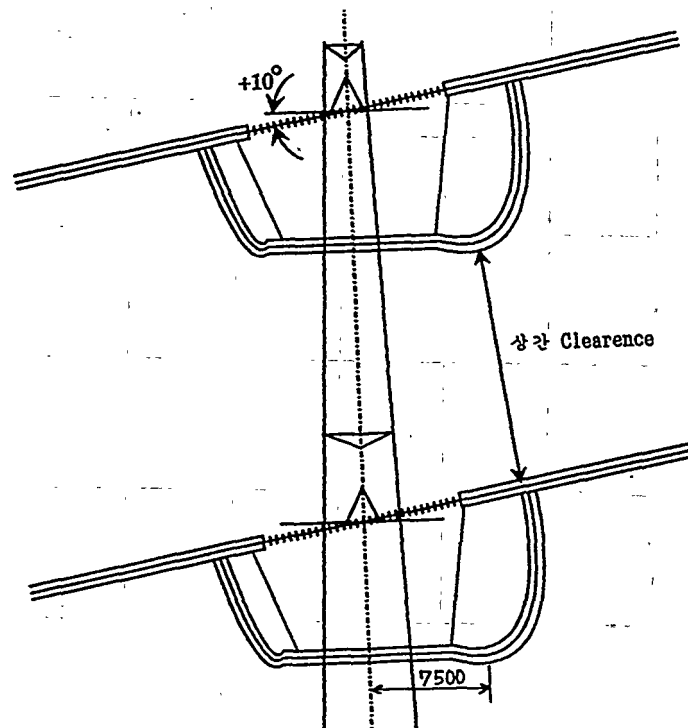
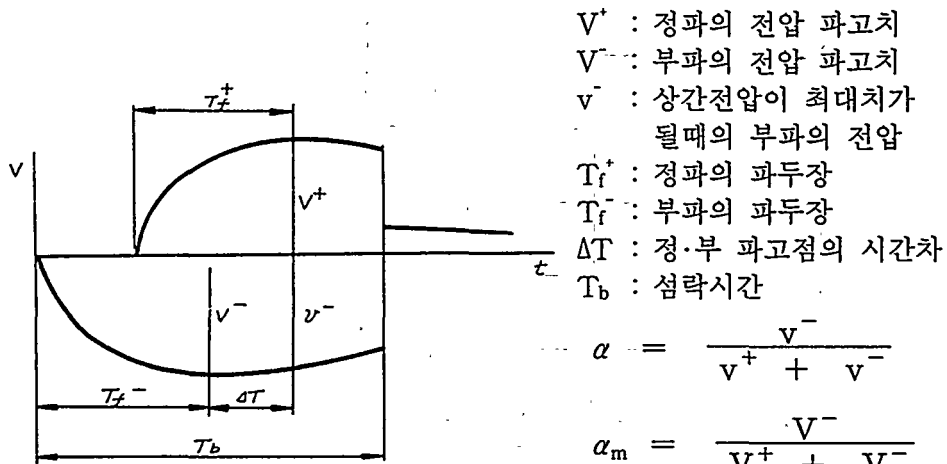


그림 부3.22 고저차가 현저한 산악지의 상간 Clearance



($\alpha_m=0.33\sim0.5$ 범위에서 성립)

그림 부3.23 상간 개폐 임펄스 전압파형 및 파라메타

(2) 파두장의 영향

상간 섬락 특성은 대지간 섬락 특성과 같이 인가 파형의 파두장에 대하여 <그림 부3.24>와 같이 U 특성을 나타내고 각 갭 길이에 대해 섬락 전압이 최저가 되는 임계파두장(T_{fc})이 존재한다. 이 임계파두장은 갭 길이(d)에 따라 변하고 그 관계를 식으로 개략적으로 나타낼수 있다.

$$\alpha_m=0.50 \text{의 경우} \quad T_{fc}=20d$$

$$\alpha_m=0.33 \text{의 경우} \quad T_{fc}=30d$$

$$T_{fc} : \text{임계파두장} (\mu S) \quad d : \text{갭길이} (m)$$

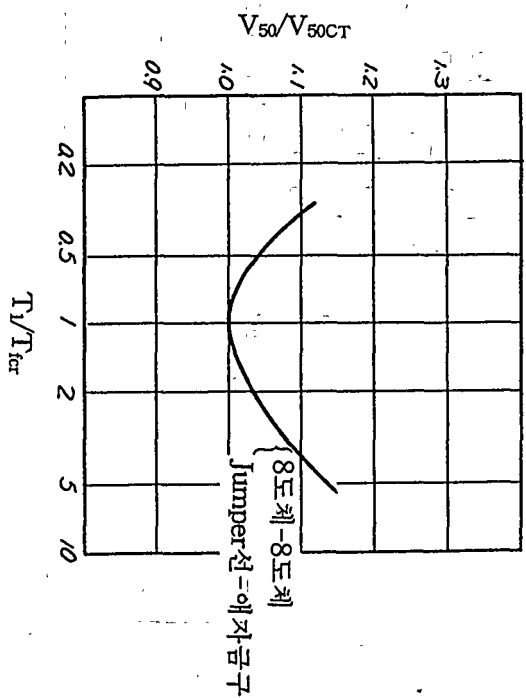


그림 부3.24 파두점의 영향

(3) 정파, 부파의 비율(a_m)의 영향

정파와 부파의 전압 파고치의 합에 대한 부파 전압 파고치의 비율(a_m)이 작아지면 <그림 부3.25>와 같이 삼각전압이 저하한다. a_m 과 50% 삼각전압(V_{50})

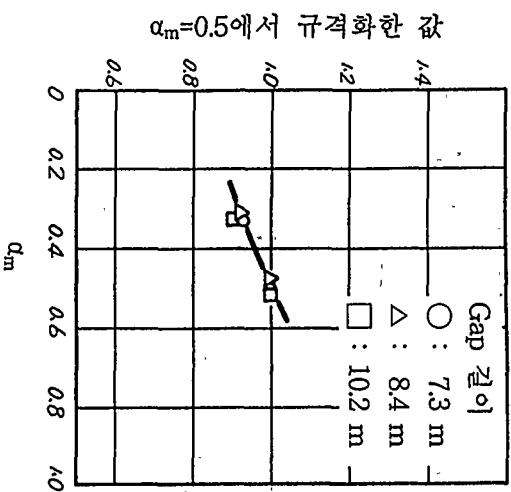


그림 부3.25 a_m 의 영향(Jumper선~애자금구, $\Delta t=0$)

에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$V_{50} \propto \frac{1}{1-0.35\alpha_m} \quad (\text{단, } \Delta T=0)$$

나. 상간 섬락 특성^[15,28,31]

<표 부3.12>는 상간 개폐섬락특성에 관한 여러가지 연구결과를 나타낸 것이다. 표의 수식 중에서 비교적 널리 사용되는 것은 Gallet 및 Paulson 의 식이나, 본 검토에는 대지간 섬락특성에 대한 검토시와 같은 이유로 CRIEPI에서 1985년에 제시한 식을 사용하였다.

표 부3.2 상간개폐섬락특성

제 안 자	50%섬락전압(CFO)	공극계수(k)	비 고
Gallet,et.al (1978) ^[2]	$3400 \cdot K / (1+8/d)$	1.36 ~ 1.8	S:섬락거리 H:도체의 높이 α :전압비
Cortina,et.al (1981) ^[2]	$\frac{640 \cdot S^{0.6} \cdot (1-0.25 \cdot d/H)}{1-\alpha(0.14+0.54 \cdot d/h)}$	0.86 - 0.54 d/H	
Paulson,et.al (1983) ^[2]	$3400 \cdot k / (1+8/d)$	1.36 - 0.6 α	
CRIEPI (1982) ^[6]	$k \cdot 1080 \cdot \ln(0.46d+1)$	평행 도체:1.79 비대칭도체:1.54	
CRIEPI (1985) ^[5]	$2570 \cdot \ln(0.25d+1)$	-	$\alpha_m = 0.5, t = 0$

<그림 부3.26>은 $\alpha_m = 0.5, \Delta t = 0$ 일 때의 각종 Gap의 섬락특성에 대한 여러 연구소의 시험결과를 함께 나타낸 것이다. 각각의 섬락특성은 차이가 있으며, 이는 전극형상의 차이 때문인 것으로 생각된다. 따라서 상간 개폐과전압에 대한 시험도 실제의 형상과 가까운 형상으로 시험을 행하는 것이 중요하다.

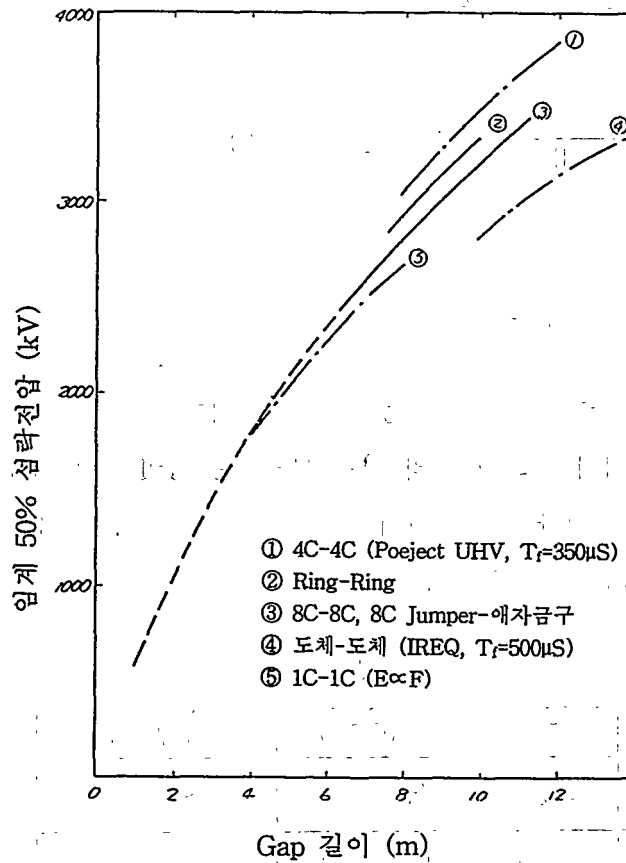


그림 부3.26 상간 개폐과전압 점락특성 ($\alpha_m=0.5$, $\Delta t=0$)

4. 오손 및 적설애자련의 점락특성^[27,28]

가. 오손애자의 점락특성

(1) 염분오손

염분오손애자는 개폐임펄스의 파미장이 커지면 내전압이 낮아지게 되며, 예로써 2500(μs) 파미장에 대한 내전압은 1000(μs) 파미장에 대한 내전압에 비하여 약 30% 낮아진다. 따라서 염분오손애자의 개폐 임펄스 내전압특성을 검토할 경우에는 인가파형의 파미장에 대하여 충분한 주의가 필요하다.

염분부착밀도가 $0.06 \sim 1.0(\text{mg}/\text{cm}^2)$ 의 범위에서는 오손애자의 개폐 임펄스 내전압은 애자연결길이에 비례하여 상승하며 $0.03(\text{mg}/\text{cm}^2)$ 에서는 청정애자의 주수내전압특성과 일치한다. 또한 개폐 임펄스 내전압을 교류내전압 파고치와 비교하면 그 배수는 염분부착밀도에 따라 $2.0 \sim 2.5$ 범위에 있는 것으로 나타났다.

(2) 진 애 오 손

<그림 부3.27>은 250mm 현수애자의 청정 및 석분오손시의 개폐과전압 최저점락전압의 파두장특성을 나타낸 것이다. 이에 의하면 석분오손애자(평등오손)의 최저 점락전압은 난용성물질인 석분의 영향 때문에 어떠한 파두장에서든 청정애자의 경우에 비하여 10% 정도 낮아지게 된다.

한편 불평등오손애자(애자의 상반부가 석분오손, 하면이 청정인 애자)의 경우, 최저 점락전압은 석분평등오손애자의 경우에 비하여 20~25%의 매우 큰 폭으로 저하하지만 이와같은 극단적인 불평등오손 특성에 대하여는 실제의 상황을 감안하여 검토하여야 한다.

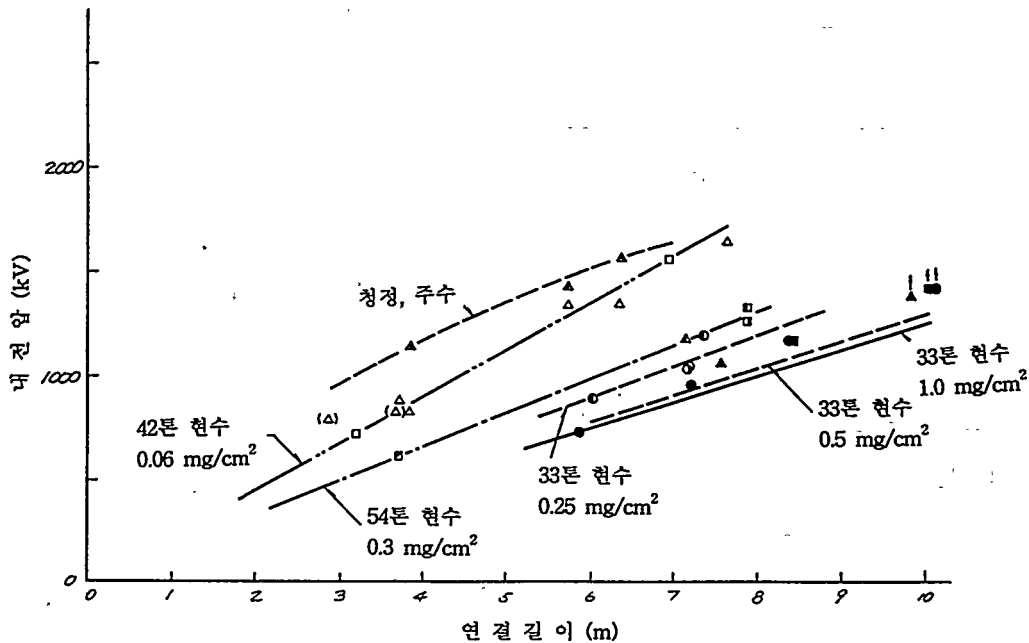


그림 부3.27 250mm 현수애자 개폐임펄스 내전압의 파두장 특성(무중시험)

나. 적설애지련의 섬락특성

적설에는 청정적설과 오손적설이 있으나 오손에 의한 영향은 명확하지 않으므로 본 검토에서는 청정적설에 대하여 검토하였다.

<그림 부3.28>은 애지련이 눈에 덮힌 비율에 대한 50%섬락전압을 나타낸 것으로, 눈덮인 비율이 60~80% 정도일 경우에 최소섬락전압이 얻어진다.

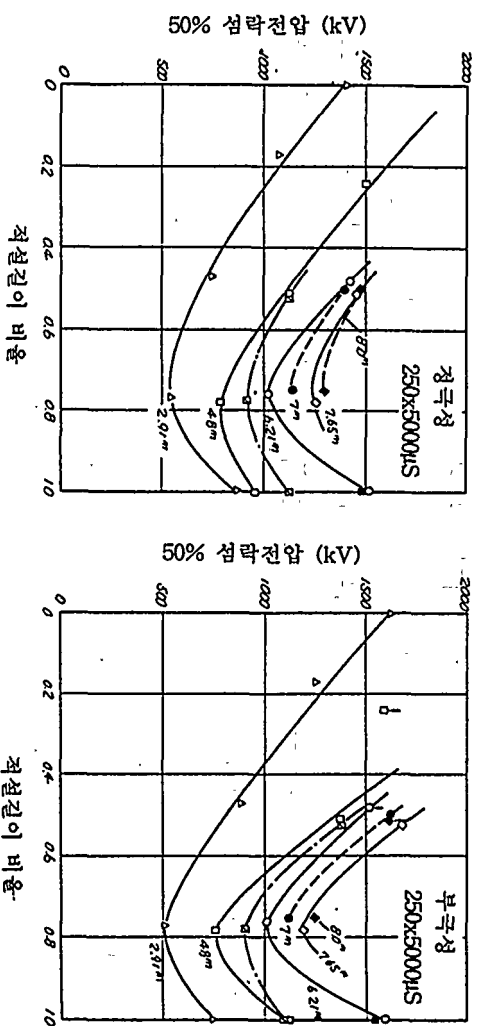


그림 부3.28 적설애지련의 눈덮힌 거리비율과 섬락전압

<그림 부3.29>는 2련내장과 4련내장에 대한 단위길이당 최소 50% 섬락전압과 적설밀도와의 관계를 나타낸 것이다. 편치는 있지만 2련 및 4련내장에 대한 시험 결과 모두 적설밀도가 커짐에 따라 섬락전압이 조금씩 저하하는 경향을 보였으며, 2련내장에 비하여 4련내장의 경우, 섬락전압이 조금 낮은 것으로 되었다.

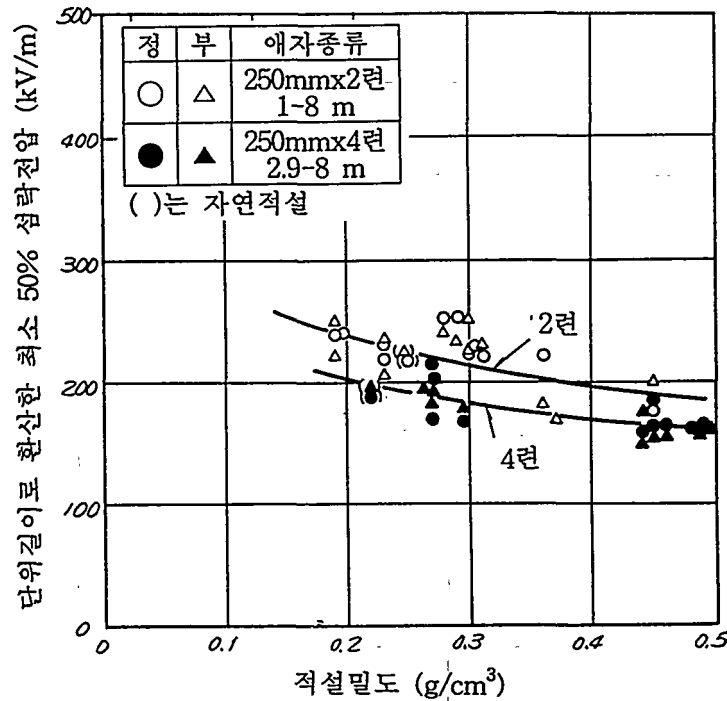


그림 부3.29 적설밀도와 최소 50% 접촉전압

따라서 적설밀도 0.3(g/cm³)일 때 애자런길이당 50% 접촉전압은 4선내장은 170(kV/m), 2선내장은 220(kV/m)가 되며, 3선내장은 그 중간값을 취하여 195(kV/m)로 하였다. <표 부3.33>은 이러한 방법으로 50% 접촉전압의 편차를 고려하여 각 적설지역에 대한 애자런의 설계내전압을 나타낸 것이다.

표 부3.3 적설지역 내장애자런의 m당 설계내전압^[9,29,33]

항 목	적 설 구 분	적 설 I			적 설 II		
		2 선	3 선	4 선	2 선	3 선	4 선
눈을 녹인 물의 도전을		100 (μV/cm)			50 (μV/cm)		
50% 접촉전압 (V ₅₀) (kV/m)		220	195	170	220	195	170
m당설계내전압(V _w) (kV/m)		154	136	119	176	156	136
비 고		V _w = V ₅₀ · (1 - 3σ) (σ = 10%)			V _w = V ₅₀ · (1 - 2σ) (σ = 10%)		

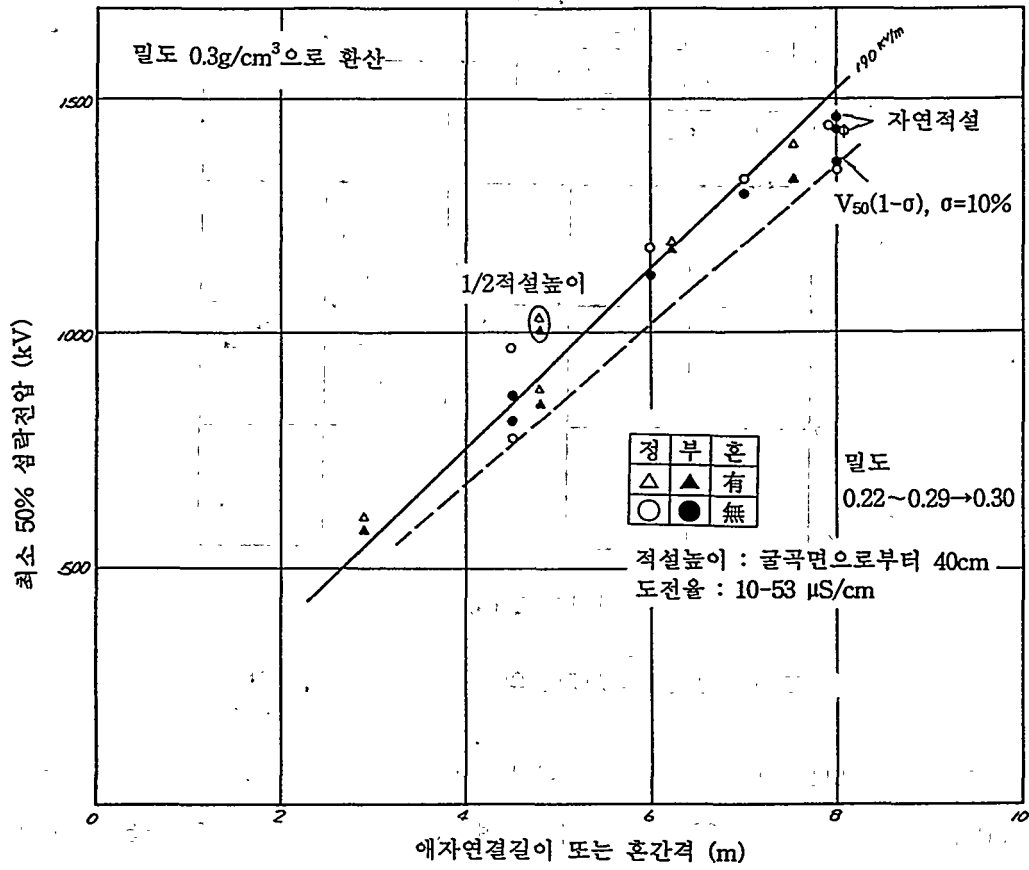


그림 부3.30 적설밀도 0.3g/cm^2 로 환산한 경우 2련 및 4련내장 적설애자련의 개폐과전압 섬락특성^[9,29]

부록 4. 뇌과전압에 대한 절연설계 자료

1. 차폐실패 사고율

송전선은 가공지선에 의해 차폐되어 도체에의 직격뢰를 방지토록 하고 있으며 뇌차폐에 대해서는 여러 가지 방법이 제안되고 있으나 주로 A-W이론에 근거를 두고 있다.

낙뢰에 관한 송전선의 영향은 역섬락사고율(BFOR:back flashover rate)과 차폐실패사고율(SFFOR:shielding failure flashover rate)로 나누어질 수 있다.^[18] 여기서 BFOR은 낙뢰가 철탑 및 가공지선에 떨어져 철탑의 순간적인 전위상승에 의해 상도체로 역섬락하는 사고를 말하고 SFFOR은 낙뢰가 상도체에 맞는, 즉 가공지선에 의한 차폐가 실패되어 섬락하는 회수를 말한다. BFOR은 주로 낙뢰파형 및 접지저항등에 크게 좌우되고, SFFOR은 가공지선 및 상도체의 배열, 즉 철탑의 형태에 의해서 좌우되게 된다.

가. 차폐실패 사고율의 계산식

EGM에 근거를 두면 대상으로 하고 있는 상도체의 차폐실패 사고건수(n 회/100km년)(이하 이 단위로 표시한 사고건수를 줄여서 사고율이라고 표기한다)는 다음식으로 계산될 수 있다.^[29]

$$n = N \int_{I_{0min}}^{I_{0max}} P(I_0) r_{ss} \cdot \int_{\theta_2}^{\theta_1} \int_{\alpha_2}^{\alpha_1} \frac{\sin(\theta - \alpha)}{\cos \alpha} \cdot f(\alpha) \cdot d\alpha \cdot d\theta \cdot dI_0 \quad (\text{부4.1})$$

단,

N : 대지 뇌격밀도(회/ $\text{km}^2 \cdot \text{년}$)

$P(I_0)$: 뇌격전류의 확률 밀도함수(%값에 대하여, $\int_0^\infty P(I_0)dI_0 = 100\%$)

r_{ss} : 대상으로 하고 있는 상도체의 뇌격거리[m]

α : 낙뢰침입각(연직선과 침입뢰(leader)가 이루는 각)

$f(\alpha)$: 뇌침입각 확률분포함수

θ : 대상으로 하고 있는 상도체의 중심으로부터의 노출각(exposure arc)
상에 존재하는 임의의 점에 그은 직선이 수평선과 이루는 각도.

I_0 : 뇌격전류(kA)

I_{0min} : 이 뇌격전류이하에서는 대상도체에 직격이 있어도 섬락을 일으키지 않는 뇌격전류(임계 뇌격전류[kA])

I_{0max} : 완전차폐가 되는 한계 뇌격전류[kA]

나. 차폐실패 사고율의 계산조건

<식 부4.1>을 계산하는 경우, 필요한 N , $P(I_0)$, I_{0min} , I_{0max} , $g(\alpha)$ 및 r_{ss} 을 다음과 같이 결정한다.

(1) N :대지 뇌격밀도[건/ km^2].

N 은 뇌격 뇌우일수(IKL:isokeraunic level)의 1/10정도로 고려하여 N 은 2[회/ $\text{km}^2/\text{년}$]로 했다. 이것은 우리나라의 뇌격 뇌우일수 20에 상당한다.

(2) $P(I_0)$ [100%]

뇌격전류의 분포로써 다음의 관계식을 사용한다.

$$P(I_0) = 4.75 \cdot e^{-I_0/20} + 0.1 \cdot e^{I_0/50} \quad (\text{부4.2})$$

(3) r_{ss} : 뇌격유인거리[m](striking distance)

$$r_{ss} = \alpha_h \cdot r_{sg}$$

이 식에서 α_h 는 높이효과를 고려한 계수이고 r_{sg} 는 대지 뇌격거리로서 제안자에 따라 여러가지 식으로 표현되나 그 차이는 그리 크지 않다.

$$r_{sg} = KI_0^n$$

표 부4.1 제안자에 따른 r_{sg} 의 계수

제안자	년도	K	n	비 고
Wagner	1962	10.6	0.51	
Golde	1973	3.3	0.78	
Davis	1963	0.2	1.3	
Love	1973	10.0	0.65	
Whitehead	1968	6.0	0.8	A-W이론을 이용한 식
Whitehead	1973	8.5	1.5	

(4) I_{0min}

$$I_{0min} = \frac{2\overline{V_{50}}}{Z_{surge}}(kV)^{[5]} \quad (\text{부4.3})$$

여기서 $\overline{V_{50}}$ 은 부뢰임펄스(negative impulse)에 대한 50%섬락(flash-over)전압(kV)이다.

이 식도 제안자에 따라 여러가지로 표현되고 있으나 그 차이는 10%정도이다. V_{50} 을 더욱 정확히 모의하기 위해서는 CIGRE의 V-t곡선에 의거하여 구할 수 있으나 계산이 복잡한 것에 비하면 실용성이 떨어진다.^[36]

$$\text{정극성 } V_{50} = 0.55d + 80[kV]$$

$$\text{부극성 } V_{50} = 0.58d + 190[kV]^{[28]}$$

$$V_{50} = 605 \times d^{[31]} \quad (\text{부4.4})$$

여기서 d 는 아킹흔 간격[m]이고 각각 내장형철탑 4.4m 및 현수형철탑 4.75m로 계산하였다.

Z_{surge} :대상 상도체의 썬지 임피던스(surge impedance)[Ω]로써 EMTP (Electro-Magnetic Transient Program)을 이용하여 계산하였다. 이때 필요한 입력으로써는 사용전선과 Bundle의 형상 그리고 전선의 지상고이다. <그림 부 4.1>은 사용한 Rail전선(480 mm^2)의 구조를 보이고 있다. EMTP계산결과 임피던스(Z)는 평균 360 [Ω]이다.

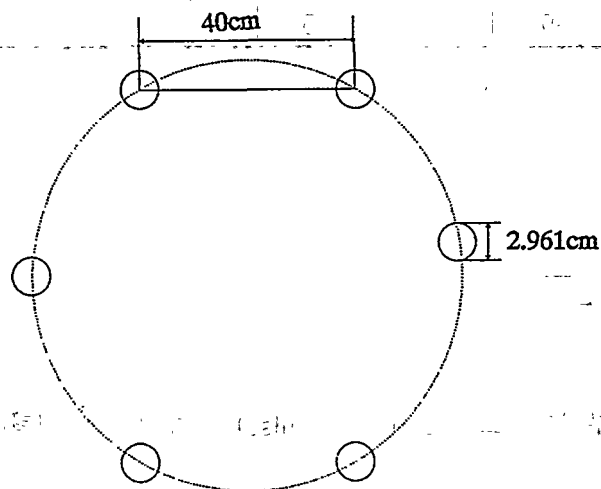


그림 부4.1 Z_{surge} 계산을 위한 복도체구조

(5) $f(\alpha)$: 낙뢰침입각 확률분포함수.

침입하는 뇌의 분포를 각도에 따라 어떻게 분포되는가를 나타내고 있으며 m 값이 클수록 수직으로 침입하는 낙뢰가 많음을 표시한다.

$$f(\alpha) = \begin{cases} 0 & (-\pi \leq \alpha \leq -\pi/2) \\ k_m \cdot \cos^m \alpha & (-\pi/2 \leq \alpha \leq \pi/2) \\ 0 & (\pi/2 \leq \alpha \leq \pi) \end{cases} \quad (\text{부4.5})$$

여기서 $k_m = \frac{1}{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^m \alpha \cdot d\alpha}$ 이고 $m=3$ 으로 했다.

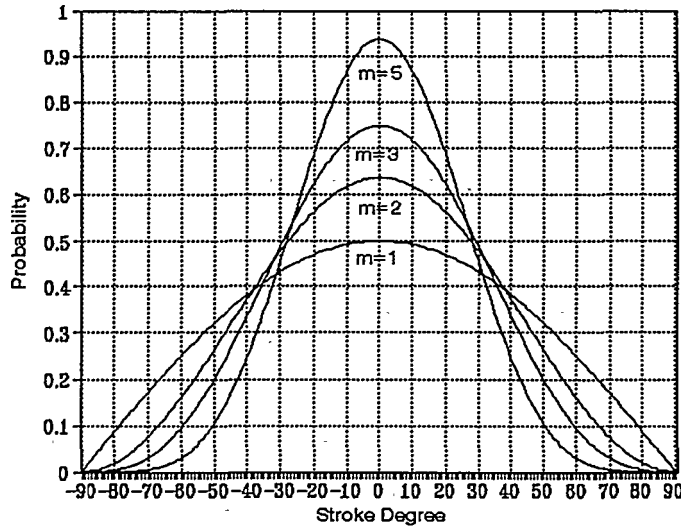


그림 부4.2 낙뢰 확률분포함수

(6) I_{0max} 의 계산

완전차폐가 되는 한계전류값으로 EGM법으로 구할 수 있고 여기서는 프로그램에 의해 철탑좌표를 입력하면 자동으로 구할 수 있다. <그림 부4.3>은 대상도체 C_2 가 상부도체 혹은 가공지선 C_1 과 하부도체 C_3 를 중심으로한 뇌격거리에

의해 완전히 둘러싸여져 있음을 나타내고 있고 이 뇌격거리 r_{ss} 로부터 완전차폐되는 최대 뇌격전류를 계산할 수 있다.

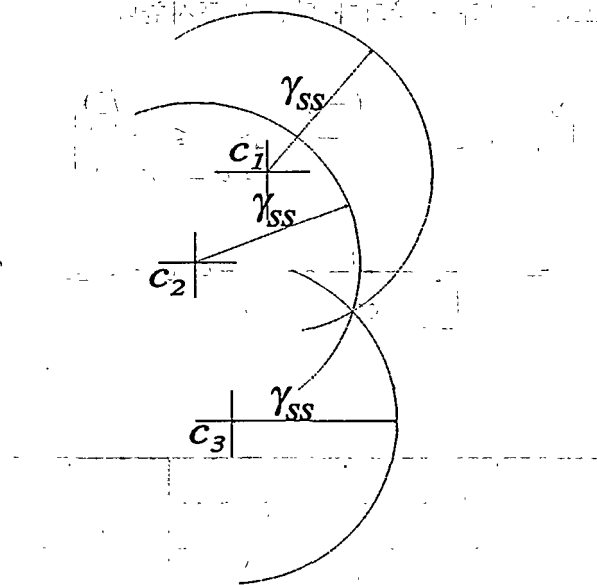


그림 부4.3 완전차폐를 구하기 위한 설명도

다. 차폐실패 사고율의 계산 알고리즘

<그림 부4.4(a)>는 가공지선, 전력선의 뇌격유인거리 r_{ss} , 대지로의 뇌격거리 r_{sg} 가 주어진 경우에 전선 C_2 의 차폐실패율계산을 위한 설명도이다.

뇌격이 짧은 선으로 표시된 원호에 도달하면 전선 C_2 에의 뇌격이 되고, 이 뇌격에 의해 경우에 따라 사고로 연결될 수도 있다. 이 원호 이외의 원호 혹은 대지에 평행하고 높이 $K_g r_{ss}$ 인 직선에 도착하는 뇌격은 전선 C_2 가 아닌 가공지선, 혹은 $C_1, C_3, K_g r_{ss}$ 인 평행선에 뇌격하게 된다.

이 원호의 중간에 임의의 θ 위치의 미소면적 $r_{ss} d\theta$ 에 도달하는 뇌격확률 dX 는 다음식으로 구해진다.

$$\Delta X = r_{ss} \Delta \theta \int_{\alpha_2}^{\alpha_1} \frac{\sin(\theta - \alpha)}{\cos \alpha} f(\alpha) d\alpha \quad (\text{부4.6})$$

이 식을 θ_1 부터 θ_2 까지 적분하면 임의의 r_{ss} 에 대한 차폐실패확률 X 가 구해지게 된다.

$$X = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \Delta X = r_{ss} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\alpha_2}^{\alpha_1} \sin(\theta - \alpha) f(\alpha) \cdot d\alpha d\theta \quad (\text{부4.7})$$

결국 <그림 부4.4(b)>에서 보는 바와 같이 도체 C_2 에서의 뇌격거리가 이루는 원의 원호가 주어지는 경우 임의의 α 에 대해서 θ_1 에서 θ_2 의 범위를 적분한 값은 대지로의 투영길이 L 이 된다. 그러나 실제로 θ_1 및 θ_2 는 각각의 α 에 대해서 매우 복잡하게 변화하게 되므로 이를 간단하게 계산하는 것은 불가능하게 된다.

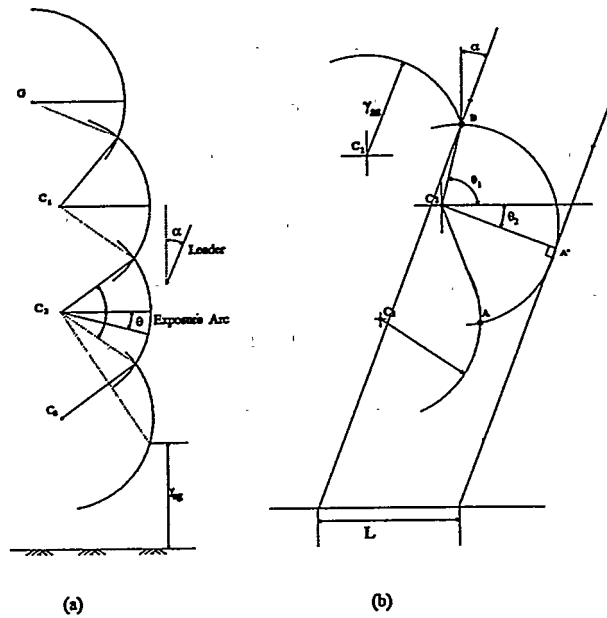


그림 부4.4 차폐실패 개념도

(1) α 의 변화에 따른 θ 의 변화

α 는 기본적으로 <그림 부4.4>에서와 같이 수직선을 기준으로 하여 -90° 에서부터 90° 까지 변하는 것으로 고려하였으나 실제 알고리즘에 적용할 경우에는 일반적인 수학적 표현으로 사용한다. 이것은 결국 수평위로부터 수직위까지를 고려 대상으로 한다는 의미이다. α 를 180° 부터 서서히 감소시키면서 θ_1 과 θ_2 의 거동을 살펴보면 어느 구간에서는 α 와 선형적인 관계로 변화하고 어느 구간에서는 변화하지 않고, 어느 구간에서는 비선형적인 관계를 가지면서 변화하게 되므로 이 구간을 결정짓는 α 의 값을 정의할 필요성이 요구된다.

(가) 용어의 정의

- ① $\alpha_{\max}$: 낙뢰의 침입각을 180° 로부터 서서히 감소시키면 대상도체에 처음으로 뇌격하는 각도이다. 이에 대한 그림이 <그림 부4.5(a)>이며 이때의 θ_1 과 θ_2 는 언제나 같은 값을 갖게되고 이 때의 $\alpha_{\max}$ 는 대상도체와 상부도체의 좌표에 의해 구해진다.
- ② α_{ui} : <그림 부4.5(b)>에 나타낸 바와 같이 뇌격유인거리에서 대상도체와 상부도체가 그리는 원이 만나는 두점중에서 y좌표값이 큰 점에서 상부도체에 대한 접선과 수직선과 이루는 각을 의미한다.
- ③ α_{di} : <그림 부4.5(c)>에 나타낸 바와 같이 어느 뇌격유인거리에서 대상도체와 상부도체가 그리는 원이 만나는 두점중에서 y좌표값이 큰 점에서 대상도체에 대한 접선과 수직선과 이루는 각을 의미한다.
- ④ α_{90} : <그림 부4.5(d)>는 수평위인 경우의 θ_1 과 θ_2 에 대한 그림이다.

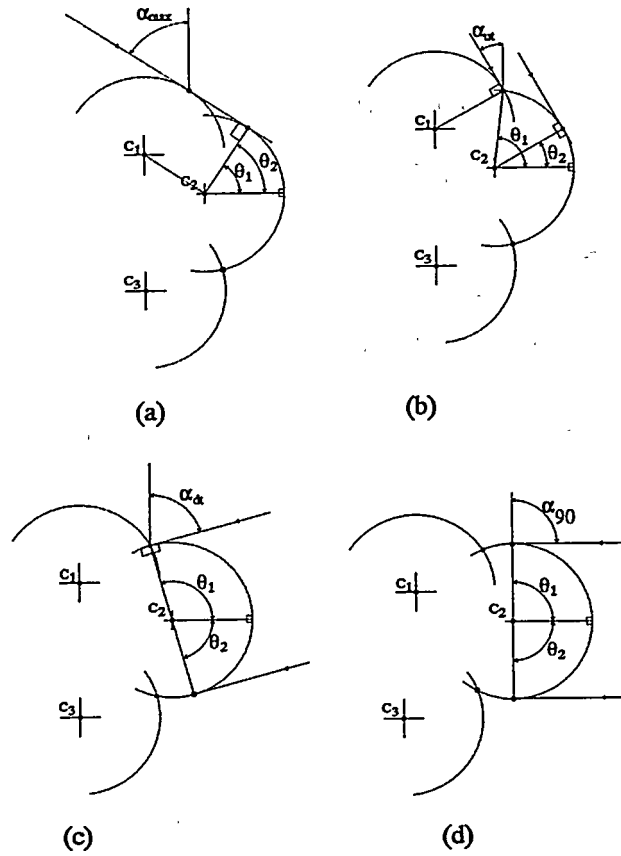


그림 부4.5 계산알고리즘을 위한 침입각 설명도

(나) α 에 대한 구간별 θ_1 과 θ_2 의 계산

① $\alpha_{\max} \leq \alpha \leq \alpha_{ul}$ 일때

• θ_1 의 결정

<그림 부4.6>에서 α 로 입사한 뇌격이 상부도체가 중심인 반경 r_s 인 원과 만나는 교점 (T)은 다음식에 의해 결정된다.

$$\begin{aligned} x_t &= x_1 + r_{ss} \cos(\alpha) \\ y_t &= y_1 + r_{ss} \sin(\alpha) \end{aligned} \quad (\text{부4.8})$$

윗식에 의해 구한 좌표 $T(x_t, y_t)$ 를 지나고 대상도체가 중심인 원과 만나는 두 점은 다음 방정식에 의해서 구해진다.

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 &= r_{ss}^2 \\ y &= \tan^{-1}(\alpha) + b_G \\ b_G &= y_t - \tan^{-1}(\alpha) \cdot x_t \end{aligned} \quad (\text{부4.9})$$

이식에 의해 구한 두점 중에서 y 축의 값이 큰 교점이 S_u 이므로 θ_1 은 다음 식으로 표현된다. 이 구간에서 낙뢰의 입사각에 대해 θ_1 의 궤적을 살펴보면 비 직선으로 변화함을 알 수 있다.

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{y_u}{x_u}\right) \quad (\text{부4.10})$$

• θ_2 의 결정

α 로 입사한 뇌격이 대상도체가 중심인 원과 한점에서 만나는 점은 다음식에 의해 구해진다.

$$\begin{aligned} x_q &= x_2 + r_{ss} \cos(\alpha) \\ y_q &= y_2 + r_{ss} \sin(\alpha) \end{aligned}$$

이 식에 의해 θ_2 를 구하면 다음식과 같다.

$$\theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{y_q}{x_q}\right) \quad (\text{부4.11})$$

or

$$\theta_2 = 90^\circ - (\alpha + 90^\circ)$$

이 식에서 보는 바와 같이 α 에 대한 θ_2 의 궤적은 직선적으로 변화한다.

② $\alpha_{ut} \leq \alpha \leq \alpha_{dt}$ 일때

- θ_1 의 결정: 이 구간에서는 α 의 변화에 대한 θ_1 의 변화는 r_{ss} 가 정해지고 도체의 위치가 정해지면 다음의 값으로 일정한 값을 갖는다. 그러나 이 값은 뇌격전류의 크기, 철탑의 크기, 도체의 배열등에 의해 다른 값을 갖는다.

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{y_p}{x_p}\right) \quad (\text{부4.12})$$

- θ_2 의 결정: α 의 변화에 대한 θ_2 의 변화는 θ_1 과는 달리 α 에 대해서 1차함수인 직선적 관계를 갖는다.

$$\theta_2 = 90^\circ - (\alpha + 90^\circ) \quad (\text{부4.13})$$

③ $\alpha_{dt} \leq \alpha \leq \alpha_{90}$ 일때

이 구간은 비교적 뇌격전류가 작고, 즉, r_{ss} 가 비교적 작은 값이고 도체간격이 비교적 큰 경우에 존재하게 되고 그렇지 않은 경우는 존재하지 않을 수도 있다.

- θ_1 의 결정: 만일 $\angle MC_2V \leq 90^\circ$ 이면 이 구간에서 θ_1 은 ②에서의 값으로 일정하게 되고 $\angle MC_2V > 90^\circ$ 이면 다음의 식으로 주어진다.

$$\theta_1 = 90^\circ - (\alpha - 90^\circ) \quad (\text{부4.14})$$

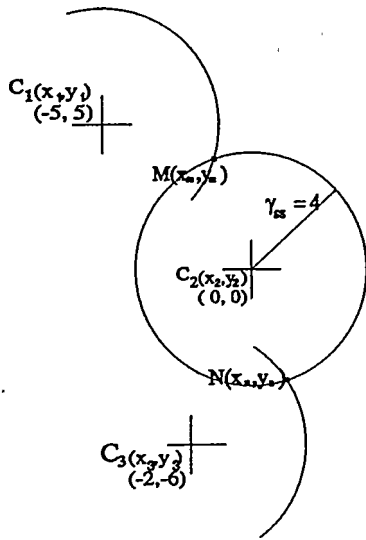
- θ_2 의 결정: 만일 $\angle NC_2V \leq 90^\circ$ 이면 이 구간에서 θ_2 는 N점에 의해서 결정되는 $\angle NC_2V$ 보다 더 커질 수는 없으며, θ_2 의 크기가 $\angle NC_2V$ 와 같게 될 때까지는 다음식에 의해 α 에 대한 일차식으로 결정된다.

(2) 알고리즘계산 적용례

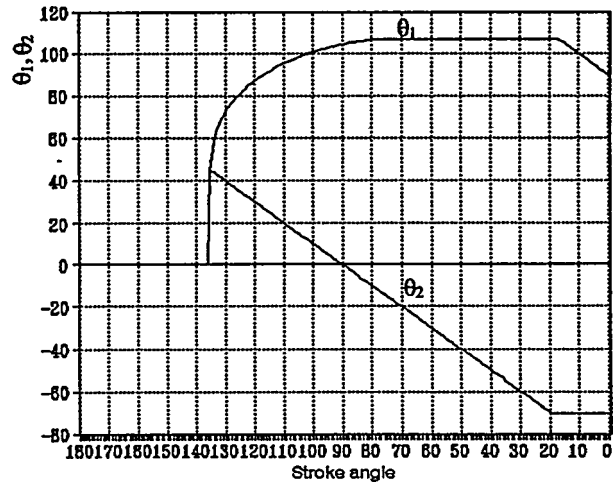
지금까지 설명한 θ_1 과 θ_2 의 궤적을 <그림 부4.7>에 나타내고 있다. 프로그램으로 구한 각각의 좌표와 앞에서 정의한 뇌침입각은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \alpha_{\max} &: 135^\circ \\ \alpha_{ut} &: 72.8855^\circ \\ \alpha_{dt} &: 17.1144^\circ \\ M(x_m, y_m) &: (-1.177, 3.8229) \\ N(x_n, y_n) &: (-3.8229, 1.177) \end{aligned}$$

단, 이 때의 값은 그림의 α 값보다 90° 큰 값이다. <그림 부4.7(b)>에서 알 수 있듯이 θ_1, θ_2 의 궤적은 곡선구간, 직선구간, 일정구간 그리고 변곡점이 존재한다. 이 점이 간단한 식으로 단순화하기 곤란한 점들중의 하나가 된다.



(a)



(b)

그림 부4.7 알고리즘 증명을 위한 예제

2. 역섬락사고율

가공지선에 뇌격이 있을 경우, 뇌격에 의해 애자선에 나타나는 전압은, 철탑암의 전압과 전력선에 유도되는 전압과의 차이이며 전력선에 유도되는 전압은 결합계수에 의해 산출된다. 또한 이들 전압은 가공지선의 뇌격진행파로 인접철탑에서 반사되는 부전압파에 의해 변화한다. 이 모든 요소들은 철탑의 써지임피던스, 가공지선의 써지임피던스등을 사용하여 진행파이론으로 해석할 수 있다.^[15] 본 연구에서는 계산의 정밀도를 높이기 위하여 EMTP를 이용하였다.

가. 가정조건

예측계산의 전제조건으로써 다음의 사항을 가정한다.

a. 송전선에의 뇌격은 Armstrong-Whitehead의 이론을 따른다.

b. 대지전격전류의 크기 $I_0(kA)$ 는 다음의 확률분포를 취한다.

$$P(I_0) = 0.0475e^{-I_0/20} + 0.001e^{-I_0/50} \quad \left(\int_0^{\infty} P(I_0)dI_0 = 1.0 \right)$$

c. 뇌방전의 전선흡입범위(뇌격거리) $r_{ss}(m)$ 은 다음식에 따른다.

$$r_{ss} = 6.72 I_0^{0.8} \quad (I_0: kA)$$

d. 전격각도 θ 의 분포는 다음의 확률밀도함수 $P(\theta, m)$ 에 따른다.

$$p(\theta, m) = K_m \cos^m \theta, \quad \left(\int_{-\pi/2}^{+\pi/2} P(\theta, m)d\theta = 1.0 \right)$$

e. 철탑뇌격에 의한 Flashover는 전부 철탑역섬락으로 계산한다.

나. 계산순서

<그림 부4.9>는 예측계산의 개요를 흐름도로써 표시한 것이다. 여기에서 계산의 기초가 되는 송전선 제 n 에의 뇌격확률 $P(n)$ (회/100km년)는 상기 $P(I_0)$ 와 $P(\theta, m)$ 가 독립적이 되므로 다음 식에 의해 계산된다.

$$P(n) = \frac{N}{10} \int_0^\infty \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} P(I_0) \cdot \delta P(I_0) \cdot P(\theta, m) dI_0 \cdot d\theta \quad (\text{부4.16})$$

단 여기서 N 은 대지뇌격밀도(회/km²년), $\delta P(n)$ 은 대지뇌격전류 I_0 뇌격각도 θ 의 뇌격이 제 n 상에 포착되는 비율이다. $\delta P(n)$ 은 <그림 부4.8>과 같이 각상의 위치벡터를 $\dot{r}_1, \dot{r}_2, \dots, \dot{r}_n$, 각상으로부터의 뇌격거리 r_{ss} 가 그리는 교점좌표를 $\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dots, \dot{Z}_n$ 으로써 이것들을 복소수 표시하는 것에 의해 (부4.8)이 된다.

$$\delta P(n) = \text{Re} \{ (\dot{Z}_{n+1} - \dot{Z}_n) \cdot e^{j\theta} \} \quad (\text{부4.17})$$

$$\dot{Z}_n = \frac{\dot{r}_n + \dot{r}_{n-1}}{2.0} + \sqrt{\dot{r}_{ss}^2 - \left(\frac{\dot{r}_n - \dot{r}_{n-1}}{2} \right)^2} \cdot J \cdot \frac{\dot{r}_n - \dot{r}_{n-1}}{|\dot{r}_n - \dot{r}_{n-1}|}$$

$$\text{단, } \Delta = \sqrt{\dot{r}_{ss}^2 - \left(\frac{|\dot{r}_n - \dot{r}_{n-1}|}{2} \right)^2}$$

$$J \cdot \frac{\dot{r}_n - \dot{r}_{n-1}}{|\dot{r}_n - \dot{r}_{n-1}|} \text{은 } \dot{r}_n - \dot{r}_{n-1} \text{에 수직인 단위벡터이다}$$

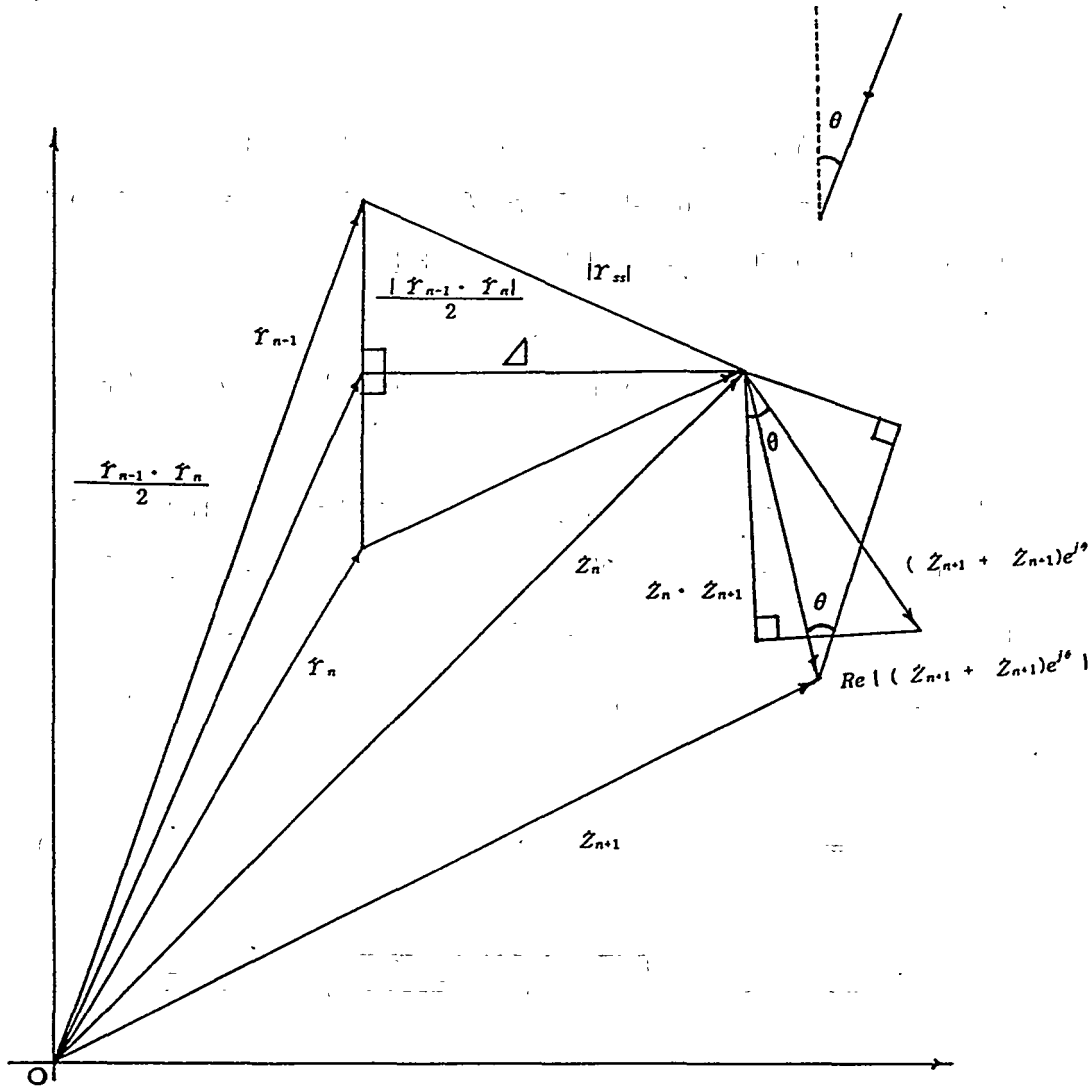


그림 부4.8 $\delta P(n)$ 의 계산좌표

또한 기호 Re 는 복소수의 실수부를 나타내고, 적분구간 θ_{n1} 과 θ_{n2} 는 $-\frac{\pi}{2} \leq \theta_{n1}$, $\frac{\pi}{2} \geq \theta_{n2}$ 범위이고 또한 $\delta P(n)$ 는 음의 값이 되지 않는 θ 의 범위를 보이고 있다.

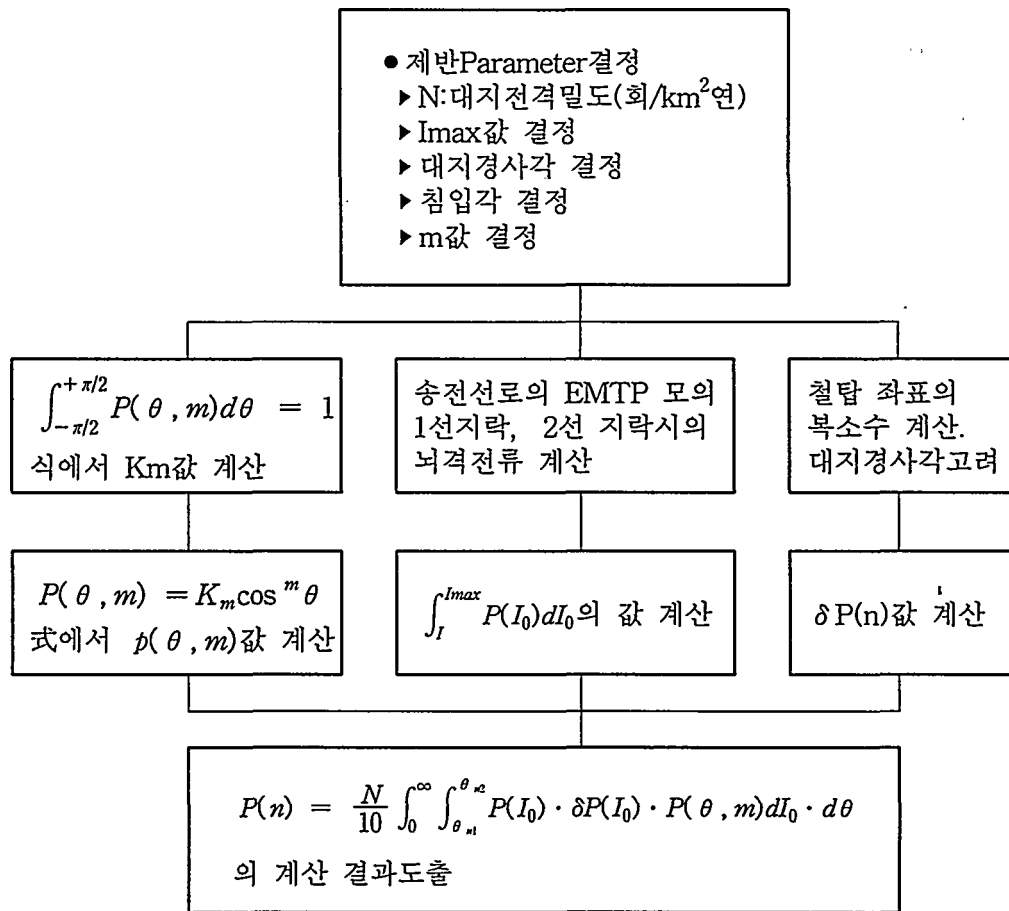


그림 부4.9 역섬락사고율 예측계산 흐름도

다. 각 파라미터의 적용

(1) N : 대지뇌격밀도(회/km² · 년)

이 값은 IKL에 해당하는 값으로 일본의 경우에는 N=3(IKL30에 해당됨)으로 하였으나 본 연구과제에서는 적용값을 IKL을 (20회/년)으로 하여 N=2로 적용하여 계산하였다.

(2) I_{max} : 상정최대뇌격전류.

현실적으로는 뇌전류를 관측하여 우리 나라의 기상조건에서 가해질 수 있는 최대뇌격전류값을 사용하는 것이 바람직하나 이에 관한 문헌 및 진행된 연구실적이 없으므로 우리의 경우보다 다소 가혹하다고 판단되는 CRIEPI의 값인 400kA로 상정하여 계산하였다

이 값은 식 $\int_I^{I_{max}} P(I_0) dI_0$ 을 계산하기 위한 값으로 <그림 부4.10>의 뇌격전류발생확률밀도분포를 갖는다.

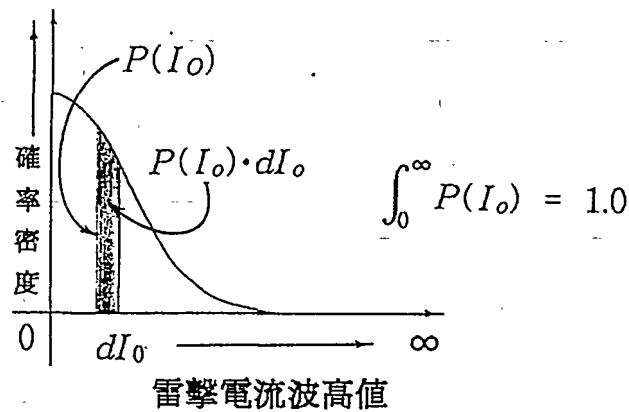


그림 부4.10 뇌격전류 발생확률 밀도분포

(3) m 값 결정

$p(\theta, m) = K_m \cos^m \theta$, ($\int_{-\pi/2}^{+\pi/2} P(\theta, m) d\theta = 1.0$)의 식으로 주어지는 뇌격침입각확률분포곡선은 <그림 부4.2>와 같으며 그 성질을 살펴보면 m 의 수가 커질수록 각도 0° (수직되)부근에 집중되고 있음을 알 수 있다. CRIEPI의 경우에 $m=3$ 으로 평가하였다. 이것에 비하면 우리의 경우에는 $m=4, 5$ 정도가 합

당할 것으로 사료되나 여기서는 가혹한 측면에서 검토하기 위하여 $m=3$ 으로 하여 계산하였다.

(4) r_{ss} : 흡인거리

제안자나 연구자에 따라 여러 형태의 식이 제안되고 있다. <그림 부4.11>은 (표 부4.1)의 제안식에 의한 뇌격전류의 크기와 흡인거리와의 관계를 그림으로 나타낸 것이다. 여기서는 식[$r_{ss}=6.72 I_0^{0.8} \cdot (I_0:kA)$]를 이용하여 계산하였다.

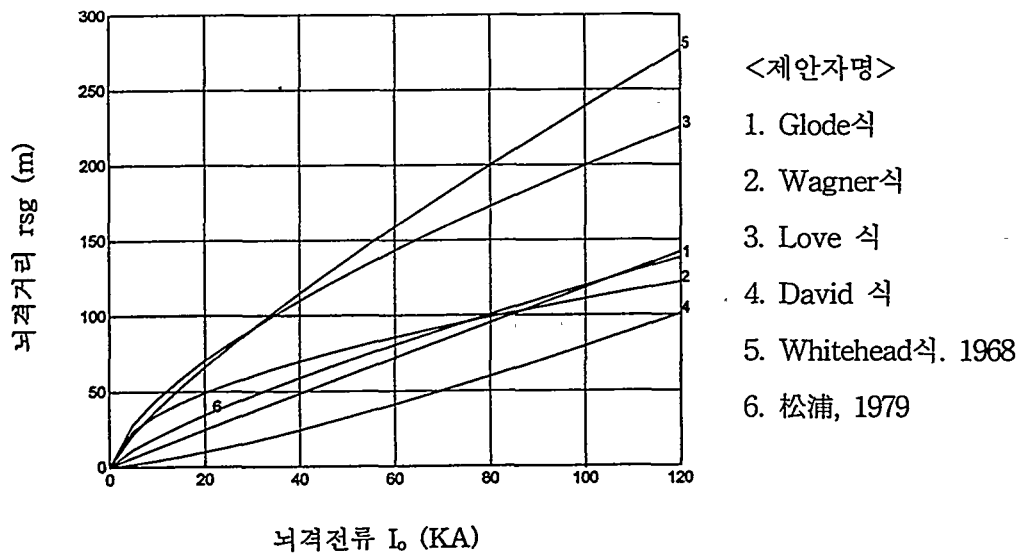


그림 부4.11 뇌격거리와 뇌격전류와의 관계

(5) $\delta P(n)$ 의 적용.

다음과 같이 고창 실증시험장 현수형철탑의 경우를 예를 들면 다음과 같다.

철탑의 치수 :

$$\dot{r}_1 = 13.3 + j82.0$$

$$\dot{r}_2 = 11.4 + j76.0$$

$$\dot{r}_3 = 11.4 + j61.0$$

$$\dot{r}_4 = 11.4 + j46.0$$

예로써 다음의 한가지 경우에 대해 설명해보면

$$r_{ss} = 6.72I_{00.8} (I_0 = kA)$$

$$I_0 = 150[kA]$$

$$r_{ss} = 370.0346 \text{인 경우의}$$

$\dot{Z}_n$ 의 계산결과:

$$\dot{Z}_1 = 000.0000 + j452.27350$$

$$\dot{Z}_2 = 365.1068 - j32.706370$$

$$\dot{Z}_3 = 381.3586 + j8.5$$

$$\dot{Z}_4 = 381.3586 + j3.5$$

복소수계산법은 원호AB에 도달하는 뇌(Stepped Leader)는 현AB에 반드시 도달하므로 현Vector $\vec{Z}$ 와 뇌격Vector $\vec{P}$ 의 Scalar적 $\vec{Z} \cdot \vec{P}$ 를 고려하여 처리하는 것이다. <그림 부4.12참조>

$$\vec{Z} \text{의 복소수표시는 } j(Z_{n+1} - Z_n)$$

$\vec{P}$ 의 복소수표시는 $\exp(j(\pi/2 - \theta)) \cdot P(\theta, m) \Delta \theta$

이므로

$$\begin{aligned} \delta P_A(n) &= \vec{Z} \cdot \vec{P} \\ &= \operatorname{Re} \{ j(Z_{n+1} - Z_n) \cdot \exp(-j(\pi/2 - \theta)) \cdot P(\theta, m) \Delta \theta \} \\ &= \operatorname{Re} \{ (Z_{n+1} - Z_n) \cdot \exp(j\theta) \} \cdot P(\theta, m) \Delta \theta \\ &= \delta P(n) \cdot P(\theta, m) \Delta \theta \end{aligned} \quad (\text{부4.18})$$

단, $\delta P(n) = \operatorname{Re} \{ (Z_{n+1} - Z_n) \cdot \exp(j\theta) \}$ 이다.

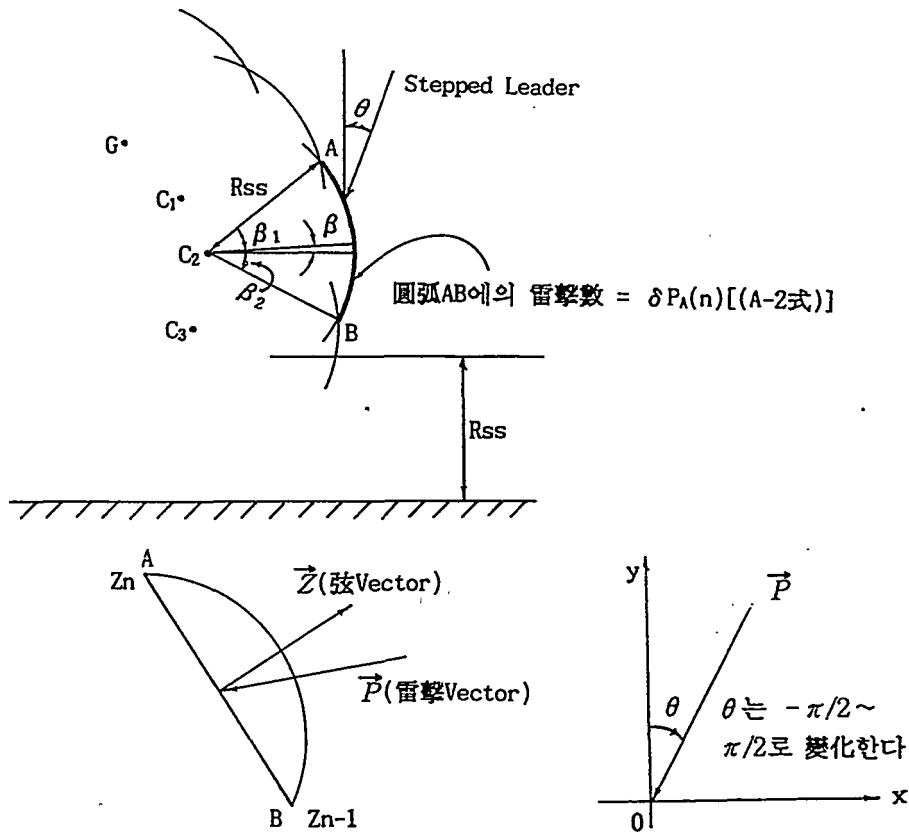


그림 부4.12 현Vector $\vec{Z}$ 와 뇌격Vector $\vec{P}$

라. 역섬락을 일으키는 뇌격전류의 크기

(1) 수계산에 의한 역섬락발생 뇌격전류 계산

가공지선의 뇌격에 의한 철탑의 전위상승과 전력선에 유도되는 전위와의 차가 애자련의 내압보다 크면 역섬락이 발생하고, 작으면 섬락이 발생하지 않는다. 역섬락을 발생시키는 뇌격전류는 다음식으로 표시된다.^[7]

$$I_L = \frac{kV - E}{(K - C)Z_T} \quad (\text{부4.19})$$

I_L : 역섬락 발생전류 (kA)

V : 아킹혼의 50%섬락전압($1*40\mu s$)(kV)

여기서 K : 상단암의 철탑내 전위상승률

C : 가공지선과 전력선과의 결합률

Z_T : 철탑탐정전위상승 임피던스(Ω)

k : 종합보정계수(표 참조)

<식 부4.19>에 의하여 파두장 $2\mu s$ 과, 탐각접지저항 $20(\Omega)$ 을 기준으로 하여 계산하여 보면

$$V_{50} = 550d + 80 \quad (kV). \quad \text{여기서 } d \text{는 아킹혼간격}$$

에서 765kV선로의 아킹혼 간격을 평균 4.7m로 보면 $I_L = 142(kA)$ 가 된다. 또 같은 방법으로 345kV 선로는 아킹혼 간격이 2.34 m이므로 $I_L = 84(kA)$ 이다.

이 계산 결과를 <표 부4.2>에 정리 하였다.

표 부4.2 철탑 역섬락 발생전류의 계산

공칭 전압 (kV)	BIL (kV)	교류전 압파고 치(kV)	아킹혼의 50% 섬락전압 (kV)						상단압 철탑내 전위상 승률	가공지 선과전 력선의 결합률	철탑전위 상승임피 던스 Z_T [Ω]	역섬락 발생전 류 I_L (kA)
			대표값 (kV)	파두보 정계수	파미보 정계수	대기보 정계수	종합보 정계수	보정값 (kV)				
765	2,250	625	2,665	1.05	1.25	1/1.11	1.193	3,179	0.8	0.3	36	142
500	1,800	429	2,200	1.05	1.25	1/1.11	1.193	2,625	0.8	0.3	34	129
345	1,300	281	1,367	1.05	1.25	1/1.11	1.193	1,631	0.8	0.3	32	84
154	750	131	850	1.05	1.25	1/1.11	1.193	1,014	0.8	0.25	29	55
66	350	56	400	1.05	1.25	1/1.11	1.193	477	0.85	0.25	28	25

$$1. E = (\text{최고최고전압}) * \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

- 주) 2. 파형보정계수와 표준파형은(1*40 us)를 →(2*50 us)로 환산
 3. 가공지선은 2조의 경우를 대상으로 하였음.
 4. BIL은 붕괴 기준임.

(2) EMTP에 의한 역섬락발생 뇌격전류 계산

위의 수계산에서는 역섬락이 발생하는 뇌격전류의 값을 일정한 값으로 하였으나 애자런(또는 아킹혼간)의 내압은 <그림 부4.13>의 CIGRE Curve와 같은 전압-시간섬락특성을 나타낸다.

애자런에는 뇌격에 의한 전압과 상용주파전압이 중첩되며, 이렇게 산출된 애자런과 암의 전위차를 애자런(또는 아킹혼)의 전압-시간 섬락특성과 비교하여 섬락이 일어나는 뇌격전류를 구할 수 있다. "FLASH"프로그램에서는, 이때 역섬락이 일어나는 시간을 2μS 및 6μS로 고정하고 이때의 발생전압과 내전압을 비교하여 검토하는 2점법을 사용 하였다.^[15]

본 연구에서는 EMTP의 TACS(Transient Analysis of Control System) 기능을 이용하여 아킹혼 V-t 특성과 발생과전압을 비교하여 역섬락이 발생하는 뇌격전류를 구하였다. 또한 보다 정밀한 계산을 위하여 EMTP계산시 철탑은 4단분할

모델을, 송전선은 8상 KCLIE법으로 모의하였다. 아킹혼의 전압-시간 섬락특성은 <그림 부4.13>의 수식을 이용 하였으며 765kV 및 345kV 전로에 대한 계산결과는 <그림 부4.14> 및 <표 부4.3>과 같다. 이때 역섬락의 발생은 "FLASH"의 2점법의 2μS보다 훨씬 빠른 0.5~2μS에서 거의 대부분이 발생하였다.

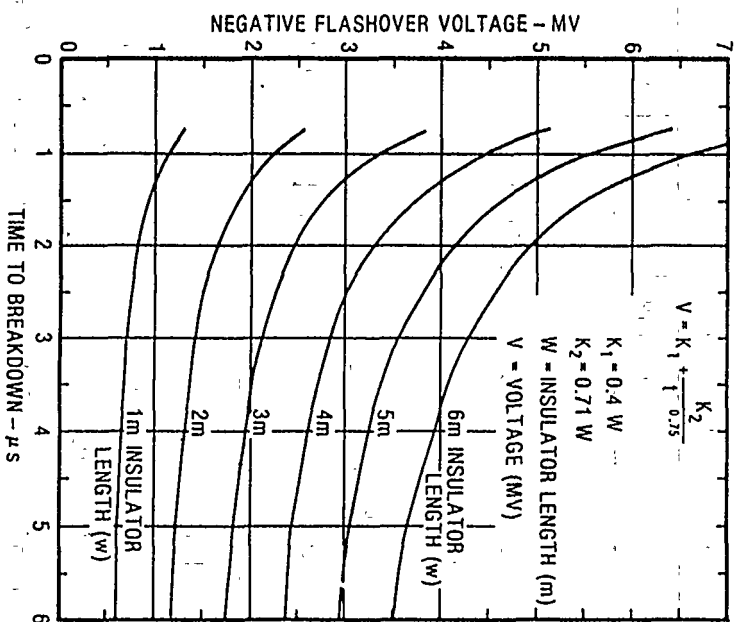


그림 부4.13 애자련의 V-t 특성

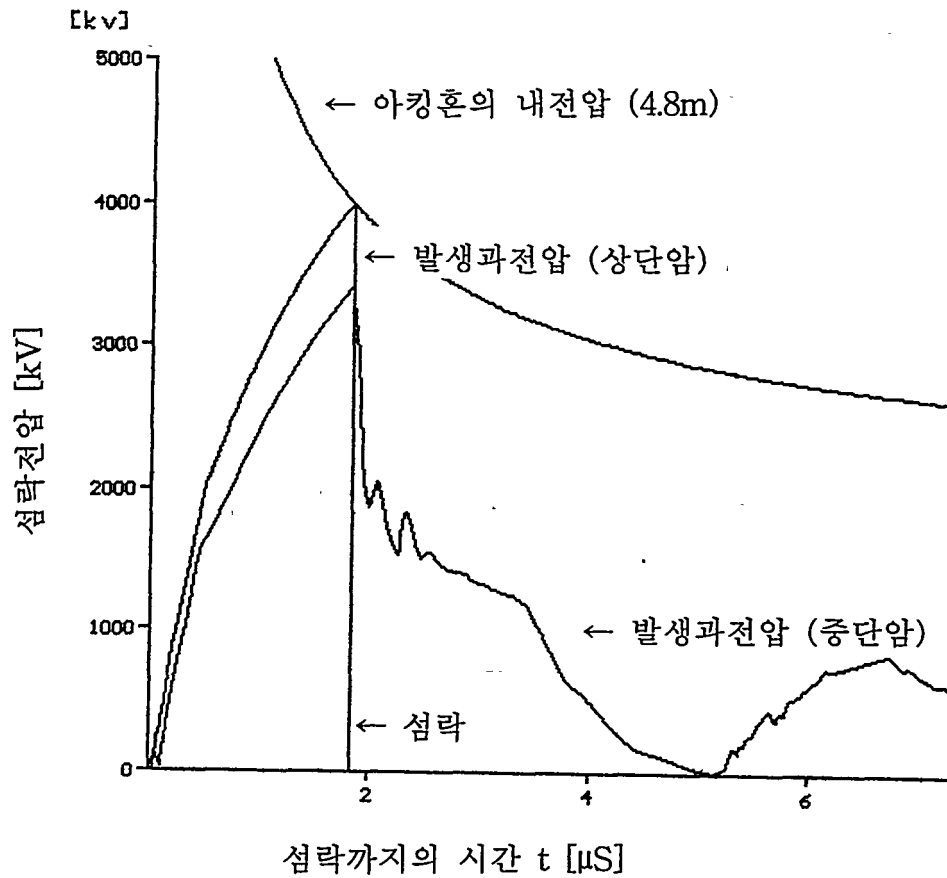


그림 부4.14 EMTP출력(섬락시)

표 부4.3 역섬락발생 뇌격전류(EMTP결과)

단위:KA

전압 \ TFR	10 (Ω)	15(Ω)	20(Ω)	30(Ω)	40(Ω)	50(Ω)
765 kV	136	130	124	112	104	96
345 kV	110	100	92	78	68	60

* TFR : Tower Footing Resistance (탐각 접지 저항)

마. 아킹혼 능력

아킹혼이 취부된 애자련의 섬락은 아킹혼간 또는 애자련의 양단에서 발생하게

된다. 이때 섬락경로는 아킹혼 간격과 애자런 길이의 비율에 따라 달라지게 된다. <그림 부4.15>는 애자런 및 혼의 V-t 특성을 나타낸 것이다. 그림의 V_0 는 혼의 섬락전압과 애자런의 섬락전압이 같아지는 값으로서, 임계통락전압이 V_0 보다 큰 V에서는 애자런의 연면섬락이 혼간섬락에 선행하므로, 애자에 손상을 줄 염려가 있다.

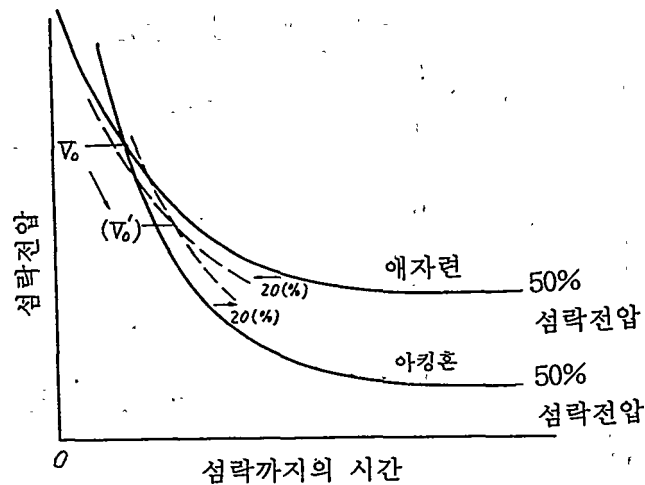


그림 부4.15 애자런 및 혼의 전압-시간 특성

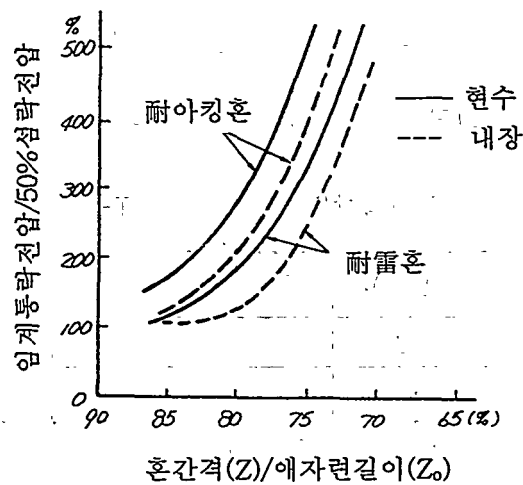


그림 부4.16 혼능률과 임계통락전압

실제로, 전압이 높은 영역에서는 애자의 V-t특성도 혼의 V-t특성도 모두 편차가 있게 되며, 양자를 조합하여 구하는 임계통락전압은 더욱 큰 편차를 갖게 된다. 그러므로 각각의 V-t 특성을 별도로 구하여 조합하지는 않는다. 즉 애자련 자체의 V-t특성은 혼의 유무에 따라 변화하는 것으로 여겨지고 있으며, 아킹혼의 주수상태때의 뇌임펄스 시험결과로부터 다음 사항을 추정할 수 있었다.

- (1) 내아크혼의 임계통락전압은 내뢰Horn의 그것보다도 약 50%정도 높다. 내아크혼을 취부하면 애자금구 주변이 차폐되어, 애자로부터 Streamer의 발생이 어렵게되며, 전선측,접지측 모두 차폐하면 그 효과는 증대된다.
- (2) 현수애자 장치는 좌우대칭으로 혼이 나와 있지만, 내장애자장치는 상면에만 있으므로 차폐효과는 감소하며, 임계통락전압도 20%정도 낮아진다.
- (3) 애자련의 연면방전은 부극성측에서 부터 시작한다.

<그림 부4.16>은 각종 혼에 대하여 임계통락전압과 혼능률의 관계를 나타낸 것이다. <그림 부4.16>에 의하면 내아크혼의 경우는 약 90%정도의 혼능률에서 임계통락전압과 50%섬락전압이 거의 같아지게 된다. 내뢰혼의 경우, 현수장치는 혼능률이 85%에 가까워지면, 내장장치는 83% 부근에서 임계통락전압과 50%섬락전압이 거의 같은 값으로 됨을 알 수 있다. 즉 내아크혼을 적용하는 경우는 혼능률 90% 정도, 내뢰혼을 적용하는 경우의 최대 혼능률은 85%~83% 정도가 되면 아크나 뇌격등으로부터 애자련을 보호할 수 있음을 알 수 있다.

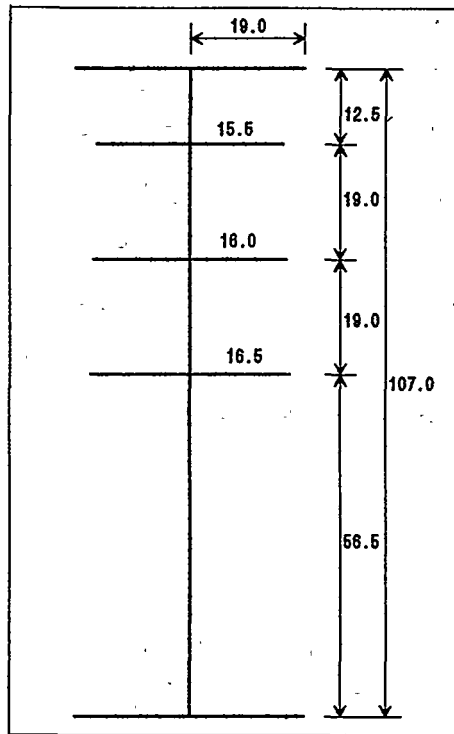
3. 뇌사고율의 계산

본 연구에서 대상으로 한 765kV 철탑은 현재 전북 고창군에 소재하고 있는 765kV실증선로를 구성하고 있는 철탑을 다소 수정하여 사용하였다. 철탑의 구조상 현수형과 내장형이 도체의 위치가 상이하므로 두 경우를 별도로 취급하였으며 현수형과 내장형의 비율은 50:50으로 가정하였다. "KLFOR"을 이용하여 일

본의 UHV, 500kV 모델 철탑에 대한 비교계산결과 유사한 경향성과 결과를 얻었다.^[16,17] 또한 345kV 송전철탑에 대하여 예측계산하고 그 결과를 뇌사고 실적치와 비교하여 보정계수를 구한 후 765kV 송전선에 대하여 예측계산 하였다.

가. 일본 UHV 철탑의 비교계산

일본의 1000kV 新潟群馬幹線の 내장형철탑을 비교대상으로 하여 검토 하였다. 계산 조건은 IKL이 30., 가공지선 2조, 전력선 최장압에 대한 창출길이 2.5m, 아



계산 조건

- IKL이 30.,
- 가공지선 2조
- 전력선 최장압에 대한 창출길이 : 2.5m
- 아킹혼 간격 : 5.9m
- 탑각접지저항은 : 10[Ω]
- 탑뇌격시 역섬락을 발생시키는 뇌격 전류의 크기 : 180[kA]
- 대지경사각 : 30 도기준(0도~30도)

그림 부4.17 1,000kV 철탑(내장형)

킥온 간격 5.9m, 탑각접지저항은 10[Ω]이며 철탑뇌격시 역섬락을 발생시키는 뇌격전류의 크기는 180[kA]이다. 계산 결과 대지경사각이 철탑 양측 모두 30도인 경우 일본의 계산결과가 0.3314[건/100km.년], “KLFOR”에 의한 결과가 0.3482[건/100km.년]으로 매우 유사한 결과를 얻었다. <그림 부4.17>에 계산에 이용된 철탑의 형태를 <그림 부4.18>에 대지경사각별 뇌사고율을 나타내었다.

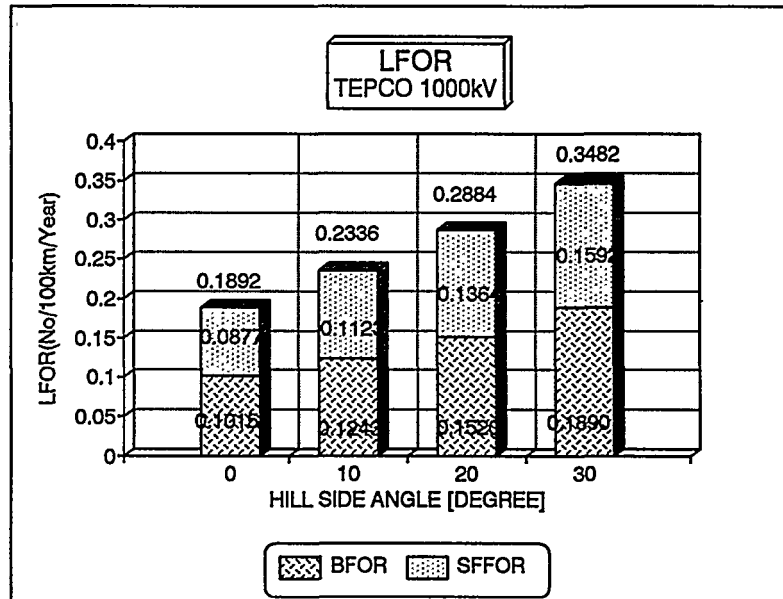
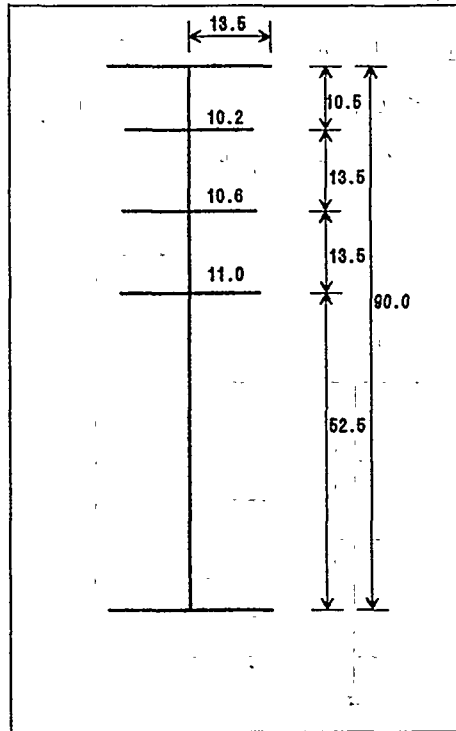


그림 부4.18 대지경사각에 따른 뇌사고율(1000kV)^[33]

나. 일본 중부전력 500kV 철탑의 비교계산

일본 중부전력의 500kV 제2外輪線の 철탑을 비교 대상으로 하여 유사한 결과를 얻었다. 계산시에 사용한 내장철탑과 계산조건을 <그림 부4.19>에 가공지선 인출길이에 따른 역섬락사고율의 변화를 <그림 부4.20>에 나타내었다.^[34]



계산 조건

- IKL : 40
- 가공지선 2조
- 전력선 최장암에 대한 창출길이: 2.5m
- 아킹혼 간격 : 3.95m
- 탐각접지저항은 : 10[Ω]
- 철탑뇌격시 역섬락을 발생시키는 뇌격 전류의 크기 : 118[kA]
- 대지경사각 : 0 도기준

그림 부4.19 500kV 철탑(내장형)의 뇌사고율 계산

계산 결과 일본 중부전력에서의 계산치인 차폐실패율 0.22[건/100km.년], 역섬락사고율 0.382건/100km.년과 유사한 값으로 차폐실패율 0.24[건/100km.년], 역섬락사고율 0.338[건/100km.년]이 얻어졌다. 따라서 “KLFOR”프로그램을 이용하여 1,000kV 및 500kV 철탑에 적용하여 계산한 결과는 일정한 경향성과 계산값이 얻어짐을 확인 할 수 있었다.

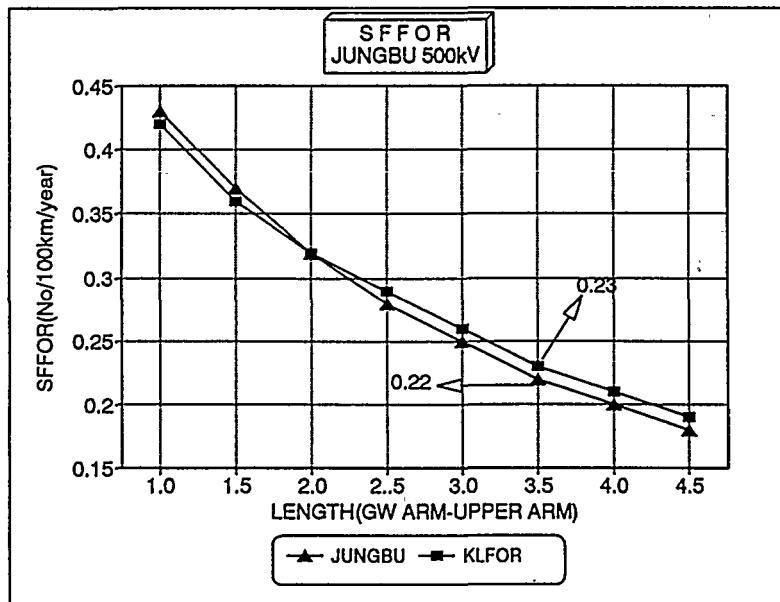


그림 부4.20 가공지선 창출길에 따른 차폐실패사고율의 변화

다. 한전 345kV 철탑의 비교계산

한전 345kV 표준철탑에 대하여 뇌사고율을 계산하고 실적치와 비교하였다. 계산시에 사용한 내장철탑과 계산조건을 <그림 부4.21>에 계산결과를 <표 부 4.4>에 나타내었다.

표 부4.4 345kV송전선의 예측뇌사고율

[회/100km.년]

차폐실패[SFFOR]	역섬락[BFOR]	뇌사고율[LFOR]	비 고
0.2547	0.6520	0.9067	IKL=20

송전선로 보호계전기 동작기준 통계결과 1977년~ 1992년 사이의 년평균 뇌사고율의 추정치는 약 0.74 [회/100km.년]이므로 예측계산 결과에 대한 보정치는

0.816으로 예측계산치가 실적치보다 약간 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.^[37]

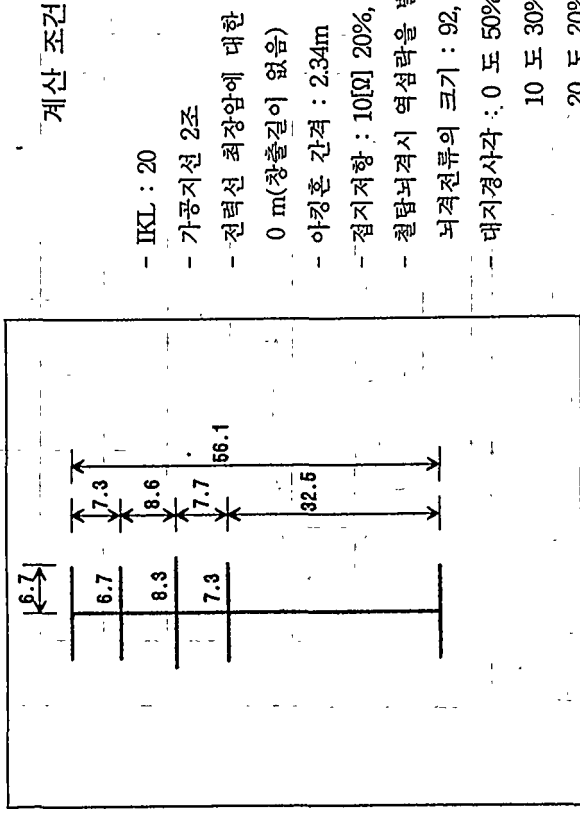


그림 부4.21 345kV 철타(내장형)의 뇌사고율계산

라. 한전 765kV 철타의 뇌사고율 계산

(1) 역섬락사고율의 계산

765kV 철타의 뇌사고율 계산에 이용된 철타의 구조는 <그림 부4.22>와 같으며 계산 조건으로는 IKL이 20회, 가공지선 2조, 전력선 최장암에 대한 창출길이 2.0m, 내장형 애자련의 아킹온 간격 4.6m, 현수형 애자련의 아킹온 간격 4.8m, 대지경사각 평균 10도, 철타타격시 역섬락을 발생시키는 뇌격전류의 크기는 타각접지저항에 따라 <표 부4.3>을 이용하여 계산하였다. 타각접지저항 변화에 따른 역섬락 사고율을 <표 부4.5>에 표시하였다.

<표 부4.5>와 같이 대지경사각을 철타 양측 공히 평균 10도로 하고 타각 접지저항의 비율을 표준치인 15[Ω]이 80%, 10[Ω]이 20%로 가정하였을 때 역섬락 사고율은 0.263[건/100km.년]이 된다.

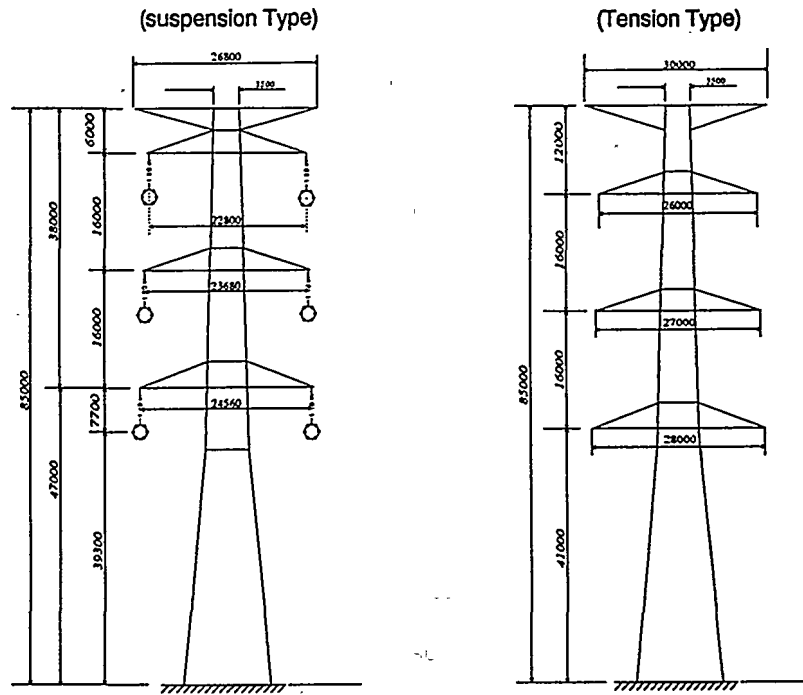


그림 부4.22 적용대상으로 한 765kV 지지물

표 부4.5 탐각접지저항에 따른 역섬락 사고율표

TFR [Ω]		10[Ω]	15[Ω]	20[Ω]	30[Ω]	40[Ω]	50[Ω]	비 고
대지경사각	내장형	0.193	0.241	0.287	0.389	0.504	0.664	TFR=15[Ω] : 80 %
	현수형	0.165	0.193	0.228	0.241	0.415	0.540	TFR=10[Ω] : 20 %
0도	평 균	0.179	0.217	0.258	0.315	0.460	0.602	0.210건
	내장형	0.243	0.303	0.360	0.489	0.634	0.834	"
	현수형	0.207	0.242	0.285	0.405	0.519	0.676	
10도	평 균	0.225	0.273	0.323	0.447	0.577	0.755	0.263건
	내장형	0.291	0.362	0.431	0.585	0.759	0.998	"
	현수형	0.247	0.289	0.342	0.483	0.620	0.807	
20도	평 균	0.269	0.326	0.386	0.534	0.690	0.903	0.315건
	내장형	0.336	0.418	0.498	0.675	0.876	1.152	"
	현수형	0.284	0.333	0.392	0.556	0.714	0.929	
30도	평 균	0.310	0.376	0.445	0.616	0.795	1.041	0.363건

(2) 차폐실패사고율의 계산

일본의 UHV, 500kV송전선과 765kV 송전선에 대한 차폐실패사고율만을 전압 계급별로 비교 계산하여 <그림 부4.23>과 같이 정리 하였다. 횡축은 가공지선암 길이의 상단암에 대한 창출길이를 중축은 뇌차폐실패사고율을 표시 하였다. 연간뇌우일수는 중부전력의 500kV가 40, UHV가 30 그리고 765kV가 20을 기준으로 하여 대지경사각은 0도인 경우를 계산 하였다. 그림에 나타낸 바와 같이 상단암에 대한 창출길이를 3.5m로 한 경우의 UHV의 차폐실패사고율과 동등한 값을 갖기위한 765kV철탑의 차폐사고율은 상단암에대한 가공지선암의 창출길이가 2.0m인 경우로 약 0.1[건/100km]년이다.

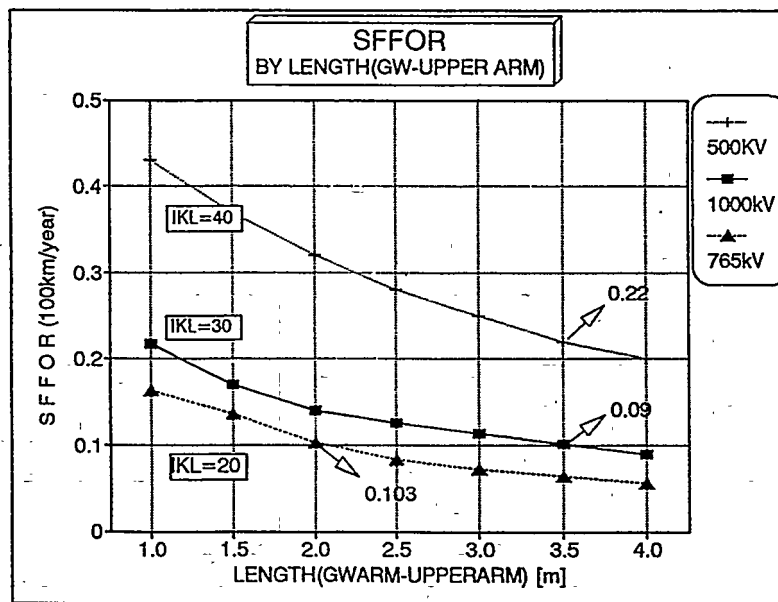


그림 부4.23 전압계급별 뇌차폐실패율

표 부4.6 가공지선암의 창출길이에 따른 뇌차폐실패율

창 출 길 이 [m]		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
차폐각(도)	현수형	-4.4	-6.6	-8.7	-11.0	-13.0
	내장형	-4.8	-7.1	-9.5	-11.8	-14.0
차폐실패사고율		0.164	0.1368	0.1031	0.0839	0.0729

<그림 부4.24>는 차폐실패율 계산시의 대지경사각을 0도로 고정하고 가공지선암의 창출길이를 변화시켜 뇌사고율을 예측계산 한 것이며 <표 부4.23>에 현수형 및 내장형 철탑의 상단암에 대한 가공지선암의 창출길이 및 이 때의 차폐각도와 차폐실패사고율을 표시하였다.

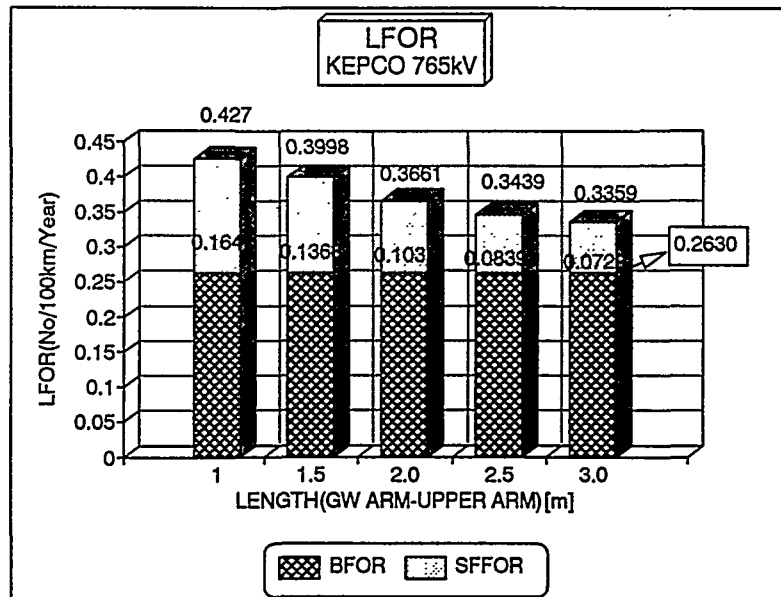


그림 부4.24 가공지선암의 창출길이에 따른 뇌사고율

<그림 부4.25>는 대지경사각을 변화시켜 뇌사고율을 예측계산 한 것으로 평균치는 대지경사각 0도가 50%, 10도가 30% 및 20도가 20%인 경우를 가정한 것이다.

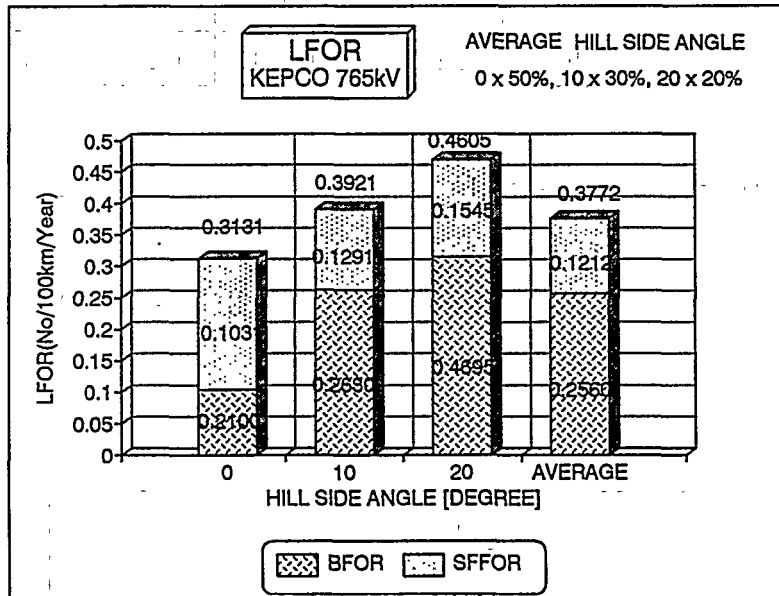
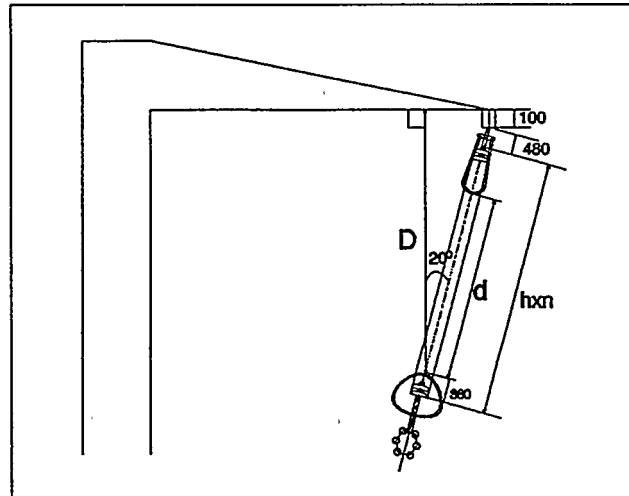
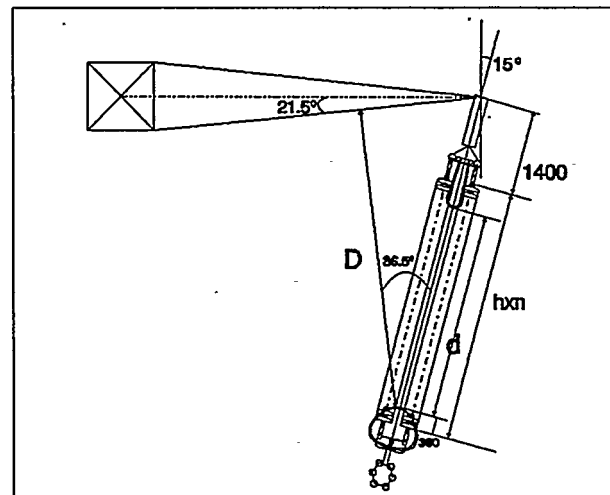


그림 부4.25 대지경사각 변화에 따른 뇌사고율

부록 5. D/d에 대한 혼간격 및 애자수량 산출방법



(a) 현수애자련



(b) 내장애자련

* 애자련 길이(D)

- 현수애자련 : (애자높이*애자수량-360+480)*cos20°+100 - 내장애자련 : (애자높이*애자수량-360+1400)*cos36.5°

그림 부5.1 765kV 송전선로의 애자장치도

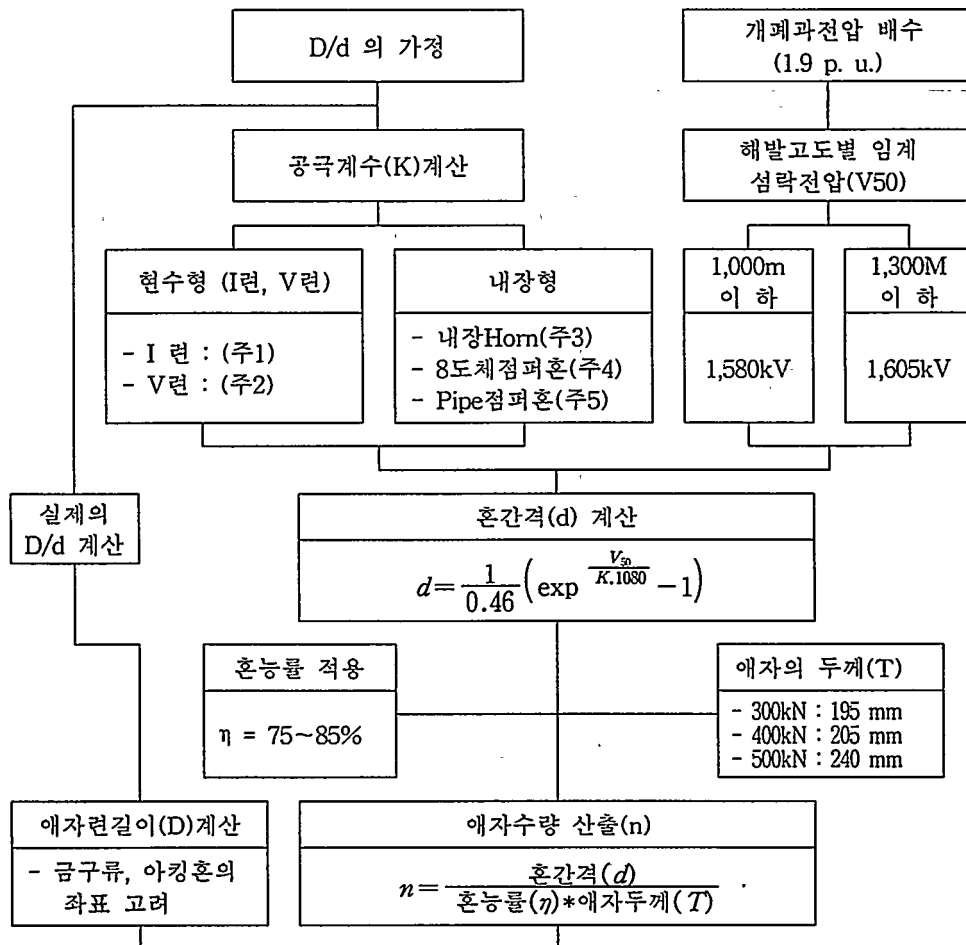
<그림 부5.1>은 현수 및 내장애자련의 혼간격(d)와 Horn~애자취부 Arm간의 간격(D)의 관계를 나타낸 것으로서, 각 금구류의 규격은 일본 1000kV 및 765kV 철탑설계 자료를 참조하였으며, 그림에서 현수애자련은 상시횡진각 20도, 내장애자련은 수평각도 15도인 경우이다.

섬락경로는 혼간 또는 Horn~Arm간이 될수 있으며, 부록 3의 Horn Gap 계수와 D/d의 관계곡선에서, 어느 D/d에 대응하는 K값 이상을 유지하면 개폐에 의한 섬락은 혼간에서 발생하게 된다. 또한 섬락전압은 K와 d의 함수이므로 어느 V_{50} 을 만족하는 K와 d의 값은 다수가 존재하게 된다. 이중 D의 값은 애자수량과 금구류의 길이로 결정되는 것이므로, 어느 일정한 금구류의 길이에 대하여 목표 V_{50} 을 만족하는 애자수량과 혼간격은 설계시 적용하고자 하는 혼능률에 따라 다양하게 조합할수 있게 된다.

실제 계산은 <그림 부5.2>와 같은 순서를 따라 이루어졌다. 그림에서처럼 금구류의 길이를 일정하게 놓고, D/d 값을 가정하여 구한 공극계수(K)를 이용하여 해발고도별 목표 V_{50} 을 만족하는 혼간격에 대한 실제의 D/d 값을 구하고, 이를 Feed-back시킴으로써 실제의 D/d 값에 대하여 목표 V_{50} 을 만족하는 혼간격 및 애자수량을 산출하였다. 이러한 과정을 적절한 혼능률(75~85%) 범위에 대하여 되풀이함으로써 설계시 적용하고자 하는 혼능률에 대하여 선택사용할수 있도록 도표화한 것이 <표 부5.1>에서 <표 부5.5>까지이다.

표 부5.1 개폐과전압에 대한 절연 소요 애자수량 산출조건

○ 현수 및 내장애자련 : 해발고도 1,000m, 1,300m	
	- 현수 : 300kN, 400kN
	- 내장 : 400kN, 530kN
○ 내장 Jumper 내혼 : 해발고도 1,000m, 1,300m	
	- Conductor Jumper : 400kN, 530kN
	- Pipe Jumper : 400kN, 530kN
○ V런 Jumper 지지장치 : 해발고도 1,000m, 1,300m	
	- 210kN, 300kN



- 주) 1. I런은 도체측 혼끝과 상단암간을 고려, $K = 1.68 \exp \left(-\frac{0.34}{D/d} \right)$
 2. V런은 도체측 혼끝과 상단암간을 고려, K계수는 부록3 2절 라항 참조
 3. 내장흔에 대하여는, $K = 2.17 \exp \left(-\frac{0.54}{D/d} \right)$
 4. 8도체 점퍼흔에 대하여는, $K = 2.25 \exp \left(-\frac{0.54}{D/d} \right)$
 5. 파이프 점퍼흔에 대하여는, $K = 2.12 \exp \left(-\frac{0.54}{D/d} \right)$

그림 부5.2 D/d에 의한 혼간격 및 애자수량 산출방법 흐름도

표 부5.2 개폐과전압에 대한 소요 애자수량 산출조합표(해발고도 1000m)

	가정 한 혼능률	가정 한 D/d	V ₅₀	K	d	애자 수량	실제의 혼능률	D	실제의 D/d
현 수 300KN	0.75	1.321	1.580	1.299	4.600	32	73.72%	6.076	1.321
	0.76	1.321	1.580	1.299	4.600	32	73.72%	6.076	1.321
	0.77	1.281	1.580	1.288	4.600	31	76.10%	5.893	1.281
	0.78	1.281	1.580	1.288	4.600	31	76.10%	5.893	1.281
	0.79	1.254	1.580	1.281	4.700	31	77.75%	5.893	1.254
	0.80	1.254	1.580	1.281	4.700	31	77.75%	5.893	1.254
	0.81	1.228	1.580	1.274	4.700	30	80.34%	5.710	1.215
	0.82	1.228	1.580	1.274	4.700	30	80.34%	5.710	1.215
	0.83	1.190	1.580	1.262	4.800	30	82.05%	5.710	1.190
	0.84	1.190	1.580	1.262	4.800	30	82.05%	5.710	1.190
현 수 400KN	0.85	1.165	1.580	1.255	4.800	30	83.76%	5.710	1.190
	0.75	1.303	1.580	1.294	4.600	30	74.80%	5.992	1.303
	0.76	1.303	1.580	1.294	4.600	30	74.80%	5.992	1.303
	0.77	1.303	1.580	1.294	4.600	30	74.80%	5.992	1.303
	0.78	1.275	1.580	1.287	4.700	30	76.42%	5.992	1.275
	0.79	1.275	1.580	1.287	4.700	30	76.42%	5.992	1.275
	0.80	1.234	1.580	1.275	4.700	29	79.06%	5.799	1.234
	0.81	1.234	1.580	1.275	4.700	29	79.06%	5.799	1.234
	0.82	1.208	1.580	1.268	4.800	29	80.74%	5.799	1.208
	0.83	1.208	1.580	1.268	4.800	29	80.74%	5.799	1.208
내 장 400KN	0.84	1.168	1.580	1.256	4.800	28	83.62%	5.607	1.168
	0.85	1.168	1.580	1.256	4.800	28	83.62%	5.607	1.168
	0.75	1.313	1.580	1.438	3.900	26	73.17%	5.121	1.313
	0.76	1.280	1.580	1.423	4.000	26	75.05%	5.121	1.280
	0.77	1.280	1.580	1.423	4.000	26	75.05%	5.121	1.280
	0.78	1.280	1.580	1.423	4.000	26	75.05%	5.121	1.280
	0.79	1.239	1.580	1.403	4.000	25	78.05%	4.956	1.239
	0.80	1.239	1.580	1.403	4.000	25	78.05%	4.956	1.239
	0.81	1.209	1.580	1.388	4.100	25	80.00%	4.956	1.209
	0.82	1.180	1.580	1.373	4.200	25	81.95%	4.956	1.180
내 장 530KN	0.83	1.180	1.580	1.373	4.200	25	81.95%	4.956	1.180
	0.84	1.180	1.580	1.373	4.200	25	81.95%	4.956	1.180
	0.85	1.180	1.580	1.373	4.200	25	81.95%	4.956	1.180
	0.75	1.303	1.580	1.434	3.900	22	73.86%	5.080	1.303
	0.76	1.270	1.580	1.418	4.000	22	75.76%	5.080	1.270
	0.77	1.270	1.580	1.418	4.000	22	75.76%	5.080	1.270
	0.78	1.270	1.580	1.418	4.000	22	75.76%	5.080	1.270
	0.79	1.270	1.580	1.418	4.000	22	75.76%	5.080	1.270
	0.80	1.239	1.580	1.403	4.000	21	79.37%	4.887	1.222
	0.81	1.239	1.580	1.403	4.000	21	79.37%	4.887	1.222
	0.82	1.210	1.580	1.389	4.100	21	81.35%	4.887	1.192
	0.83	1.210	1.580	1.389	4.100	21	81.35%	4.887	1.192
	0.84	1.164	1.580	1.365	4.200	21	83.33%	4.887	1.164
	0.85	1.164	1.580	1.365	4.200	21	83.33%	4.887	1.164

표 부5.3 개폐과전압에 대한 소요 애자수량 산출조합표 (해발고도 1300m)

	가정 한 혼농률	가정 한 D/d	V ₅₀	K	d	애자 수량	실제의 혼농률	D	실제의 D/d
현 수 300KN	0.75	1.332	1.605	1.302	4,700	33	73.04%	6,260	1.332
	0.76	1.293	1.605	1.292	4,700	32	75.32%	6,076	1.293
	0.77	1.266	1.605	1.284	4,800	32	76.92%	6,076	1.266
	0.78	1.266	1.605	1.284	4,800	32	76.92%	6,076	1.266
	0.79	1.266	1.605	1.284	4,800	32	76.92%	6,076	1.266
	0.80	1.240	1.605	1.277	4,800	31	79.40%	5,893	1.228
	0.81	1.240	1.605	1.277	4,800	31	79.40%	5,893	1.228
	0.82	1.203	1.605	1.266	4,900	31	81.06%	5,893	1.203
	0.83	1.203	1.605	1.266	4,900	31	81.06%	5,893	1.203
	0.84	1.179	1.605	1.259	5,000	31	82.71%	5,893	1.179
	0.85	1.179	1.605	1.259	5,000	31	82.71%	5,893	1.179
현 수 400KN	0.75	1.316	1.605	1.297	4,700	31	73.96%	6,185	1.316
	0.76	1.316	1.605	1.297	4,700	31	73.96%	6,185	1.316
	0.77	1.289	1.605	1.290	4,800	31	75.53%	6,185	1.289
	0.78	1.289	1.605	1.290	4,800	31	75.53%	6,185	1.289
	0.79	1.248	1.605	1.279	4,800	30	78.05%	5,992	1.248
	0.80	1.248	1.605	1.279	4,800	30	78.05%	5,992	1.248
	0.81	1.223	1.605	1.272	4,900	30	79.67%	5,992	1.223
	0.82	1.223	1.605	1.272	4,900	30	79.67%	5,992	1.223
	0.83	1.183	1.605	1.260	4,900	29	82.42%	5,799	1.183
	0.84	1.183	1.605	1.260	4,900	29	82.42%	5,799	1.183
	0.85	1.160	1.605	1.253	5,000	29	84.10%	5,799	1.160
내 장 400KN	0.75	1.321	1.605	1.442	4,000	27	72.27%	5,285	1.321
	0.76	1.289	1.605	1.427	4,000	26	75.05%	5,121	1.280
	0.77	1.289	1.605	1.427	4,000	26	75.05%	5,121	1.280
	0.78	1.289	1.605	1.427	4,000	26	75.05%	5,121	1.280
	0.79	1.249	1.605	1.408	4,000	26	76.92%	5,121	1.249
	0.80	1.249	1.605	1.408	4,100	26	76.92%	5,121	1.249
	0.81	1.219	1.605	1.393	4,200	26	78.80%	5,121	1.219
	0.82	1.191	1.605	1.379	4,300	26	80.68%	5,121	1.191
	0.83	1.191	1.605	1.379	4,300	26	80.68%	5,121	1.191
	0.84	1.164	1.605	1.365	4,300	25	83.90%	4,956	1.153
	0.85	1.164	1.605	1.365	4,300	25	83.90%	4,956	1.153
내 장 530KN	0.75	1.318	1.605	1.441	4,000	23	72.46%	5,273	1.318
	0.76	1.286	1.605	1.426	4,000	22	75.76%	5,080	1.270
	0.77	1.286	1.605	1.426	4,000	22	75.76%	5,080	1.270
	0.78	1.239	1.605	1.403	4,100	22	77.65%	5,080	1.239
	0.79	1.239	1.605	1.403	4,100	22	77.65%	5,080	1.239
	0.80	1.239	1.605	1.403	4,100	22	77.65%	5,080	1.239
	0.81	1.239	1.605	1.403	4,100	22	77.65%	5,080	1.239
	0.82	1.210	1.605	1.389	4,200	22	79.55%	5,080	1.210
	0.83	1.210	1.605	1.389	4,200	22	79.55%	5,080	1.210
	0.84	1.181	1.605	1.374	4,300	22	81.44%	5,080	1.181
	0.85	1.181	1.605	1.374	4,300	22	81.44%	5,080	1.181

표 부5.4 개폐과전압에 대한 소요 애자수량 산출조합표
(내장장치 Jumper 내 혼)

	해 발 고 도	가정 한 D/d	V ₅₀	K	d	애자수 (혼능률 80%)	애자수 (혼능률 81%)	애자수 (혼능률 82%)	애자수 (혼능률 83%)
○ Conductor Jumper									
400KN	1,000M	1.300	1.580	1.485	3.700	23	23	23	22
		1.250	1.580	1.461	3.800	24	23	23	23
		1.200	1.580	1.435	3.900	24	24	24	23
		1.150	1.580	1.407	4.000	25	25	24	24
		1.100	1.580	1.377	4.200	26	26	25	25
	1,300M	1.300	1.605	1.485	3.800	24	23	23	23
		1.250	1.605	1.461	3.900	24	24	24	23
		1.200	1.605	1.435	4.000	25	25	24	24
		1.150	1.605	1.407	4.100	26	25	25	25
		1.100	1.605	1.377	4.300	27	26	26	26
530KN	1,000M	1.300	1.580	1.485	3.700	20	20	19	19
		1.250	1.580	1.461	3.800	20	20	20	20
		1.200	1.580	1.435	3.900	21	21	20	20
		1.150	1.580	1.407	4.000	21	21	21	21
		1.100	1.580	1.377	4.200	22	22	22	22
	1,300M	1.300	1.605	1.485	3.800	20	20	20	20
		1.250	1.605	1.461	3.900	21	21	20	20
		1.200	1.605	1.435	4.000	21	21	21	21
		1.150	1.605	1.407	4.100	22	22	21	21
		1.100	1.605	1.377	4.300	23	23	22	22
○ Pipe Jumper									
400KN	1,000M	1.300	1.580	1.399	4.100	26	25	25	25
		1.250	1.580	1.376	4.200	26	26	25	25
		1.200	1.580	1.352	4.300	27	26	26	26
		1.150	1.580	1.326	4.400	27	27	27	26
		1.100	1.580	1.298	4.600	29	28	28	28
	1,300M	1.300	1.605	1.399	4.200	26	26	25	25
		1.250	1.605	1.376	4.300	27	26	26	26
		1.200	1.605	1.352	4.400	27	27	27	26
		1.150	1.605	1.326	4.500	28	28	27	27
		1.100	1.605	1.298	4.700	29	29	28	28
530KN	1,000M	1.300	1.580	1.399	4.100	22	22	21	21
		1.250	1.580	1.376	4.200	22	22	22	22
		1.200	1.580	1.352	4.300	23	23	22	22
		1.150	1.580	1.326	4.400	23	23	23	23
		1.100	1.580	1.298	4.600	24	24	24	24
	1,300M	1.300	1.605	1.399	4.200	22	22	22	22
		1.250	1.605	1.376	4.300	23	23	22	22
		1.200	1.605	1.352	4.400	23	23	23	23
		1.150	1.605	1.326	4.500	24	24	23	23
		1.100	1.605	1.298	4.700	25	25	24	24

표 부5.5 개폐과전압에 대한 소요 애자수량 산출조합표

(V런 Jumper지지)

	해 발 고 도	가 정 한 D/d	V ₅₀	K	d	애 자 수	실 제 의 혼 능 률	실 제 의 D	실 제 의 D/d
300KN	1,000M	1.300	1,580	1.347	4,300	32	68.91%	5,623	1.308
		1.250	1,580	1.324	4,400	31	72.79%	5,485	1.247
		1.200	1,580	1.301	4,600	31	76.10%	5,485	1.192
		1.150	1,580	1.276	4,700	30	80.34%	5,347	1.138
		1.100	1,580	1.249	4,900	30	83.76%	5,347	1.091
	1,300M	1.300	1,605	1.347	4,400	33	63.38%	5,760	1.309
		1.250	1,605	1.324	4,600	33	71.48%	5,760	1.252
		1.200	1,605	1.301	4,700	32	75.32%	5,623	1.196
		1.150	1,605	1.276	4,800	31	79.40%	5,485	1.143
		1.100	1,605	1.249	5,000	31	82.71%	5,485	1.097
210KN	1,000M	1.300	1,580	1.347	4,300	36	70.26%	5,538	1.288
		1.250	1,580	1.324	4,400	36	71.90%	5,538	1.259
		1.200	1,580	1.301	4,600	36	75.16%	5,538	1.204
		1.150	1,580	1.276	4,700	35	78.99%	5,418	1.153
		1.100	1,580	1.249	4,900	35	82.35%	5,418	1.106
	1,300M	1.300	1,605	1.347	4,400	38	68.11%	5,778	1.313
		1.250	1,605	1.324	4,600	38	71.21%	5,778	1.256
		1.200	1,605	1.301	4,700	37	74.72%	5,658	1.204
		1.150	1,605	1.276	4,800	36	78.43%	5,538	1.154
		1.100	1,605	1.249	5,000	36	81.70%	5,538	1.108

부록 6. 애관, 붓싱의 규격 및 오손특성

가. 애관, 붓싱의 규격

현재 생산되고 있는 애관 및 붓싱의 규격은 주로 IEC 및 ANSI의 규격을 사용하고 있으나 ANSI 규격은 정격 최고전압 800kV를, IEC 규격은 정격 최고전압 765kV를 규정하고 있다.

<표 부6.1>은 362kV급 이상의 옥외용 변압기 붓싱에 대한 ANSI/IEEE 규격을 나타낸 것이다.

표 부6.1 옥외 전력용 변압기 붓싱의 전기적 절연특성

선 로 번 호	BIL (kV)	계 통 최 고 전 압 (kV)	정 격 최 고 대 지 간 전 압 (kV)	연 면 누 거 설 리 (in)	내전압 시험				
					60Hz 1분 건조 (kV)	내 외 임 펄 스			주 수 개 폐 임 펄 스 (kV)
						전 파 Full Wave (kV)	Chopped Wave Crest (kV)	최 소 침 락 시 간 (μS)	
1	900	362	220	220	395	900	1,035	3	700
2	1,050	362	220	220	460	1,050	1,210	3	825
3	1,175	362	220	220	520	1,175	1,350	3	825
4	1,300	550	318	318	575	1,300	1,500	3	1,050
5	1,425	550	318	318	630	1,425	1,640	3	1,110
6	1,550	550	318	318	690	1,550	1,780	3	1,175
7	1,675	550	318	318	750	1,675	1,925	3	1,175
8	1,800	800	485	485	800	1,800	1,980	3	1,500
**9	1,925	800	485	----	----	1,925	2,120	3	1,600
**10	2,050	800	485	---	---	2,050	2,250	3	1,700

주) 1) 선로번호 1-8은 ANSI Std 24, 1984의 자료임

2) **는 IEEE Std 262B-1977 및 IEEE Std C 57.12.00-1993의 자료임

나. 붓싱, 애관 및 애자의 오손지역 구분

애관, 붓싱의 내오손 설계치와 송전선용 애자의 오손지역 구분을 비교하면 <표 부6.2>과 같다. 붓싱의 연면누설거리에 대한 오손등급별 분류는 ANSI 규격에는 없으며 IEC 규격에는 오손등급별 1kV당의 소요누설거리가 명시되어 있다.

표 부6.2 오손 구분에 대한 상정 최대 염분 부착밀도

우리나라	구분	청정 I	청정 II	A	B	C	D
	ESDD mg/cm^2	0.01	0.03	0.063	0.125	0.25	0.5
CIGRE	구분	---	---	Light	Medium	Heavy	Very Heavy
	ESDD mg/cm^2	---	---	0.06	0.12	0.24	0.48
IEC815	구분	---	---	Light	Medium	Heavy	Very Heavy
	ESDD mg/cm^2	---	---	0.03~0.06	0.10~0.20	0.30~0.60	---
	연면누설거리 적용기준			16mm/kV	20mm/kV	25mm/kV	31mm/kV
미국	구분	---	Very Light	Light	Moderate	Heavy	---
	ESDD mg/cm^2	---	0.03	0.06	0.10	0.10초과	---

다. 규격상 변압기 붓싱의 연면 누설거리

<표 부6.3>에 현재 사용중인 계통최고전압 362kV급 변압기 붓싱의 규격을 나타내었다. 현재 우리나라 362kV 계통에 사용중인 변압기 붓싱의 규격은 ANSI규격을 따르고 있으며 IEC규격에 의한 붓싱의 연면누설거리를 비교하면 <표 부6.4>와 같다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 현재 사용중인 변압기 붓싱은 BIL이 1,300kV가 소요되어 연면누설거리면에서 보면 공칭최고전압인 362kV급

보다 한등급 위인 550kV급 붓싱을 사용하고 있는 것을 알 수 있다. <표 부6.5>는 800kV급 붓싱의 연면누설거리를 나타내고 있는데 ANSI규격에는 오손에 의한 구분이 없으나 IEC 규격에는 오손구분별 1kV당 최소 연면누설거리를 규정하고 있다.

표 부6.3 362kV변압기 붓싱의 정격

권 선 별	정격전압(kV)	뇌임펄스내전압 (kV파고치)	최 소 연 면 누설거리(mm)	비 고
고 압 권 선	362	1,300	8,077	318 inch
중 압 권 선	170	750	3,542	140 inch
저 압 권 선	25.8	150	529	
중 성 점	25.8	150	529	직 접 접 지
	123	550	2,507	Floating

표 부6.4 362kV급 붓싱의 연면누설거리 비교

미 국	구 분	---	Very Light	Light	Moderate	Heavy	---	비 고
	ESDD mg/cm ²	---	0.03	0.06	0.10	0.10초과	---	
	변 압 기 붓 싱 의 연면누설 거리[mm]		정 격 최 고 전압 362kV		5,588		---	
			정 격 최 고 전압 550kV		8,077		사용중임 (ESB140-500)	
IEC	구 분	---	---	Light	Medium	Heavy	Very Heavy	* C.F 미고려
	ESDD mg/cm ²	---	---	0.03~0.06	0.10~0.20	0.30~0.60	---	
	연면누설거리적용기준 [mm/kV]			16	20	25	31	
	변압기 붓싱 의 연면누설 거리 [mm]		정 격 최 고 전압 362kV	5,792	7,240	9,050	11,222	* C.F 미고려
			정 격 최 고 전압 420kV	6,720	8,400	10,500	13,020	

주) C.F = Creepage Factor (붓싱의 평균직경에 의한 연면누설거리 보정계수)

표 부6.5 765kV 급 붓상의 연면누설거리 비교

미 국	구 분	---	Very Light	Light	Moderate	Heavy	---	비 고
	ESDD mg/cm^2	---	0.03	0.06	0.10	0.10초과	---	
	변압기 붓상의 연면누설거리 [mm]	정 격 최 고 전압 800kV			12,319		---	* C.F 미고려
IEC	구 분	---	---	Light	Medium	Heavy	Very Heavy	* C.F 미고려
	ESDD mg/cm^2	---	---	0.03-0.06	0.10-0.20	0.30-0.60	---	
	연면누설거리적용기준 [mm/kV]			16	20	25	31	* C.F 미고려
	변압기 붓상의 연면누설거리 [mm]	정 격 최 고 전압 765kV		12,240	15,300	19,125	23,715	
		정 격 최 고 전압 800kV		12,840	16,000	20,000	24,800	
		정 격 최 고 전압 840kV		13,440	16,800	21,000	26,040	

라. 애관, 붓상의 오손내전압특성

일본에서 UHV용 애관의 오손내전압 특성을 확인하기 위하여 실시한 SP에자 및 애관의 무중내전압시험을 통하여 일반적인 애관의 내오손 특성을 검토한다
[日本電力中央研究所報告, “交流UHVがい類の汚損耐電壓特性” 総合報告 116, 1984]

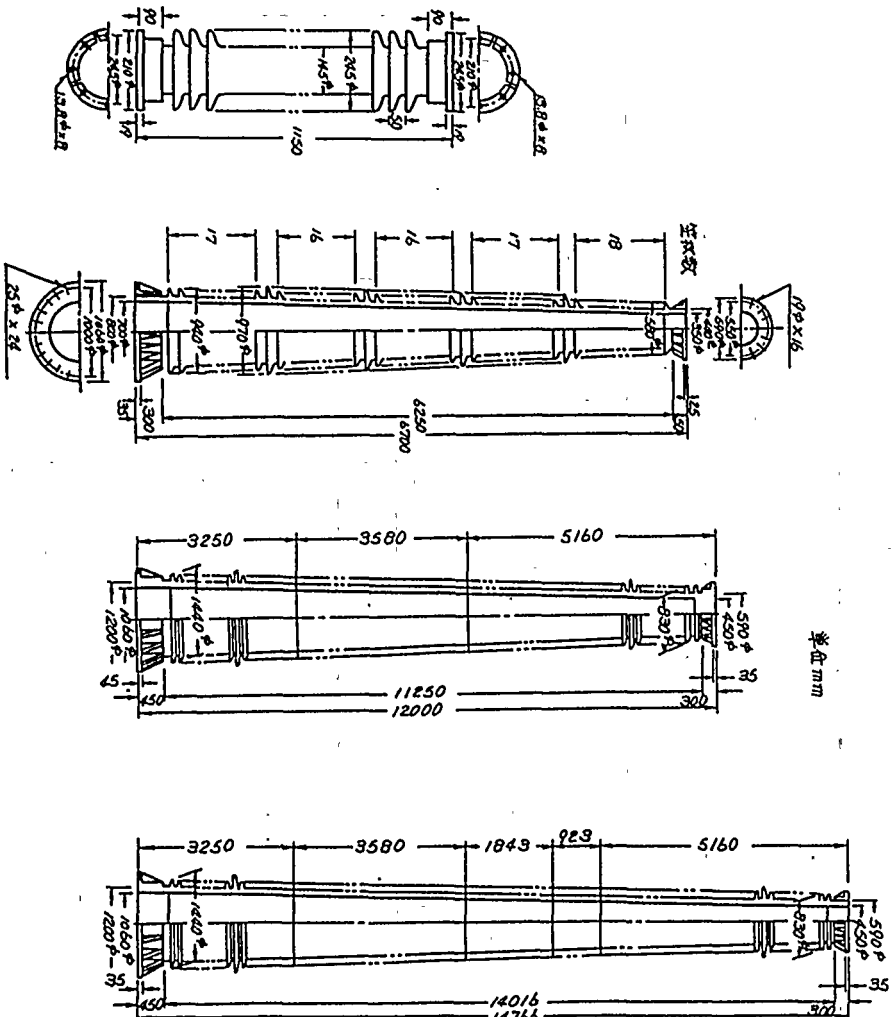
(1) 시험방법

(가) 피시험품의 제원

피시험품으로 이용한 하면주름 SP에자, 500kV용 애관 및 UHV용 애관의 형상을 <그림 부6.1>에 나타내었다. <표 부6.6>에는 하면주름 SP에자와 6.7m의 주요제원을 <표 부6.7>에는 UHV용 애관의 주요 제원을 표시하였다.

UHV용 애관에 대하여 살펴보면 15m 애관은 5단으로 구분이 가능하며 <그림 부6.1>에 갖의 형상을 표시한 바와 같이 약 1m 간격으로 하면주름이 없는 水

헛갯이 들어가고 각 수헛갯 사이에 10메의 깊은 주름 갯이 있는 형상을 하고 있다. 따라서 15m 에 관에는 13개의 수헛갯이 있다.



(a) 허면주름 SP (b) 500kV 급 6.7m (c) 12m 붓정용 (d) 15m 붓정용
애자 애관 애관 애관
그림 부6.1 피시폼 애관의 형상

표 부6.6 피시품 애자의 제원

애자의 종 류	직 경	연결길이(mm)	누설거리 (mm)	평균직경 (mm)	비 고
SP 애자	245 주1 (145)	1,150 주2 (970)	2,830	192	
6.7m애관	---	6,700 주2 (6,250)	20,400	675	

주) 1. ()는 갓의 직경, 2. ()내는 유효길이

표 부6.7 피시품 UHV애관의 제원

유효 길이 H_0 (mm)	누 설 거 리 L (mm)	평 균 직 경 D (mm)	단 락 위 치 (밑으로부터 세어서)
15m 붓싱용 애관(水切갓 총수 13매)			
14,000	60,300	998	전체길이
12,500	53,800	968	1번 水切갓 + 갓 5개
11,000	47,400	933	3번 水切갓
8,800	38,600	897	5번 水切갓
7,900	34,100	878	6번 水切갓
7,100	30,800	870	7번 水切갓
6,500	28,200	866	7번 水切갓 + 갓 5개
4,100	17,500	840	10번 水切갓
3,100	13,300	780	11번 水切갓
12m 붓싱용 애관(水切갓 총수 10매)			
11,300	48,300	1,015	전 체 길 이
10,200	44,200	985	1번 水切갓
9,200	39,700	955	2번 水切갓
7,200	31,000	895	4번 水切갓
6,200	26,700	865	5번 水切갓
3,100	13,300	780	8번 水切갓 + 갓 5개

또 애관의 최상부 및 최 하단부의 분할 애관에는 플랜지가 시멘트로 접착 되어 있다. 12m 애관은 15m 애관에 비해 2개의 짧은 분할애관이 없으므로 물차단용(水切) 갓 10매의 애관으로 되어 있다.

또 이러한 애관은 내부가 비어 있으므로 기계적 강도를 갖도록 2본의 FRP봉이 10톤의 장력으로 상하로 당기도록 되어 있다. 또한 애관 내부 섬락을 막기 위해 0.4cm^2 의 SF_6 가 봉입 되어 있다.

애관의 유효길이가 내전압에 미치는 영향을 알아보기 위해 애관 하부를 동선으로 단락시켜 유효길이를 조정하였다. 통상 단락위치로는 물차단용 갓의 바로 위 동체를 동선으로 감는데 일부의 경우는 2매의 물차단용 갓의 중간 즉 상하의 물차단용 갓으로 부터 5매째의 갓 사이에 동선을 감은 경우도 있었다. <표 부6.7>은 단락위치에 의한 피시품 애관의 제원을 나타내고 있다. 여기서 물차단용 갓의 번호는 밑에서부터 세는 것으로 하였다. 애관의 상부에는 도체직경 50cm, 외경 2m 의 도넛형 설드링 3개를 취부하여 상부의 전계를 완화토록 하였다.

또 유효길이 H_0 에 대한 누설거리(L)의 비율은, 하면주름 SP 애자, 6.7m 애관, 및 UHV 애관에 대하여 각각 2.92, 3.26 및 4.30 정도로서 애관의 직경이 커짐에 따라 유효길이에 대한 누설거리를 길게 잡아야 한다.

(나) 오손과 시험방법

식염오손에 의한 특성만을 검토하였다. 오손액과 시험방법은 송전용 애자의 시험시와 동일하게 하였다. 단, 애관은 운반이 곤란하여 건조실내에서 건조가 되지않아 무중시험의 경우 무중실 내에서 자연건조 시켰다. 또한 정인무중 시험에서는 애자의 길이를 일정하게 하고 인가전압을 5~10 % 폭으로 변화시켰다.

무중시험의 경우 가습조건은 <표 부6.8>의 가습조건 B를 적용 하였으며 비교를 위하여 가습조건 S(회전안개)에 의한 실험도 하였다. 가습조건 S는 가습조건 B에 대하여 다음 한가지만 빼면 완전히 똑같은 방법이다. 즉 증기의 분출방향

이 증기배관에 대하여 30° 정도 각도가 되도록 증기발생용 노즐을 취부하여, 발생된 증기가 피시품의 상부에서 보아 반시계 방향으로 회전하면서 위로 올라가도록 되어 있다.

표 부6.8 가습조건

노즐갯수		93	46	26	73
가 습 조 건	A	증기발생후10분간	그 후 20분간	그 후	---
	B	무중실 온도상승까지	그 후 20분간	그 후	---
	C	무중실 온도상승 5°C까지	그 후	---	---
	D	무중실 온도상승 10°C까지	그 후	---	---
	E	---	---	---	최초부터 일정
	F	증기발생후 10분간	그 후	---	---

** 보일러 압력: 5~7 kg/cm^2 2차압력 : 2 kg/cm^2

(2) 내전압 특성

(가) 가습조건과 내전압

가습조건 B와 S(회전안개)가 UHV 애관의 무중내전압에 미치는 영향을 조사하였다.

식염 5 g/l , 석회분 40 g/l 의 오손용액으로 오손시킨 10m애관(유효길이 9.2m)의 내전압은 어느경우도 700kV 이었다. 즉 애관의 근방으로부터 안개가 상승하는 표준 가습방법과 안개를 회전시켜 가습하는 방법에는 내전압에 미치는 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

(나) 염분부착 밀도와 내전압

정인무중법에 의한 내전압 특성을 <그림 부6.2> <그림 부6.3> <그림 부6.4>에 각각 SP애자, 6.7m 애관, UHV애관에 대하여 나타내었다.

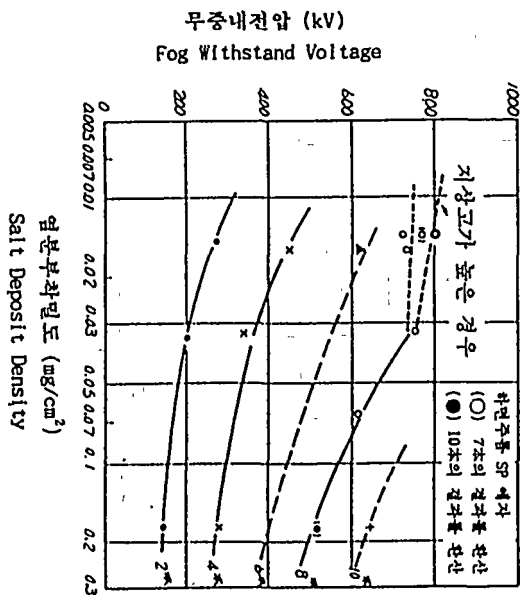


그림 부6.2 하면주름 SP 에지의 무중내전압

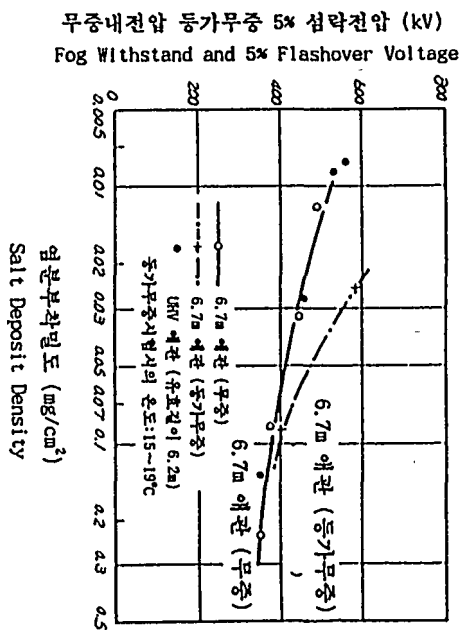


그림 부6.3 6.7m 에관의 무중 등가무중 내전압

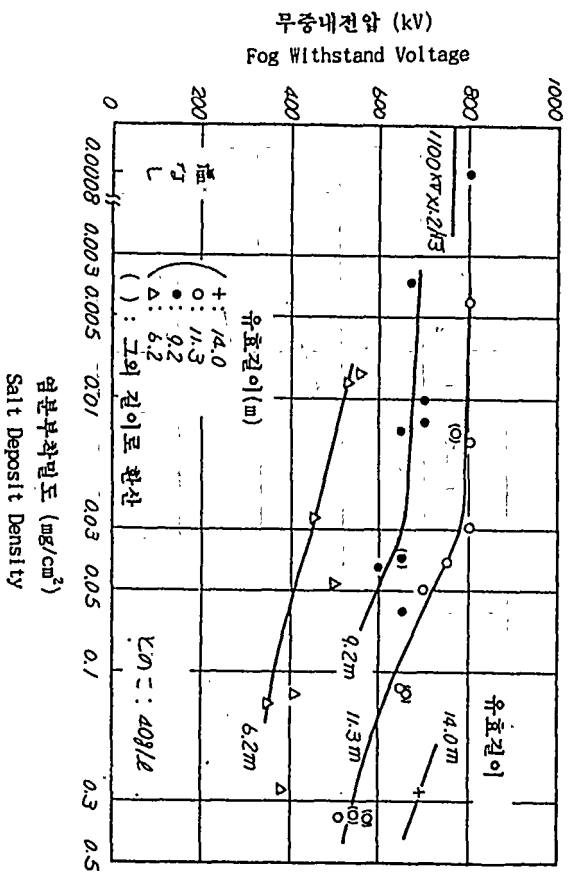


그림 부64 UV-에관의 무중내전압

염분부착밀도가 0.012~0.014 mg/cm²의 경우는 SP 에지를 이용하여 무중내전압에 미치는 지장고의 영향을 검토하여 보니 지장고 10m의 경우 무중내전압은 지장고 1m 미만의 경우에 비하여 5~10% 높았다. 이 값은 봉-봉 갭의 무중내전압과 봉-평판 갭의 무중내전압에 대한 비율(25~40%)에 비하면 작고, 오손 SP 에지의 경우 지장고의 영향이 그다지 크지않다고 생각되어, SP 에지의 무중시험은 거의 지장고 1m 정도에서 실시되었다.

각종 에지의 무중내전압특성은 다음과 같이 정리된다.

- 염분부착밀도가 0.03 mg/cm² 정도 이하에서는 시험전압의 범위내에서 에관의 무중내전압은 염분부착밀도에 따라 변하지 않고 거의 일정하였다.
- 특이한 현상을 나타내는 위와 같은 현상 이외에, 내전압은 염분부착밀도의 약 1/5승에 반비례하여 저하된다.

이상의 사실로부터 다음과 같이 추론이 가능하다. 오손도가 어느정도 이상으로 높아지면 오손면의 저항에 의해 방전의 발생이 좌우되기 때문에 내전압은 염

분부착밀도의 증가와 함께 저하된다. 한편, 오손도가 낮은 경우에는 습윤된 애관 표면에 연한 전위분포를 크게 불평등하게 하여 애관 상부의 전계를 강하게 작용토록 하기 때문에 갖의 형상에 의존하지 않는 방전의 발생이 쉬워진다. 따라서 이러한 영역에서는 무중내전압은 오손도의 영향을 받지 않아서, 애지의 유효길이에 의해 거의 결정된다.

즉, <그림 부6.3>는 유효길이 6.2m의 UHV 애관의 무중내전압특성을 나타낸 것으로, 이에 의하면 6.7m 애관(유효길이 6.25m)의 무중내전압은 유효길이 6.2m인 UHV 애관의 무중내전압과 거의 일치하고 있다.

등가무중법에 의한 내전압 특성을 <그림 부6.5> 및 <그림 부6.6>에 표시하였다. 6.7m 애관의 특성은 <그림 부6.3>에 표시한 바와 같다. 즉, 각 애지의 유효길이에 대한 염분부착밀도의 증가에 따라서 5% 섬락전압이 저하하는 경향이 확실하게 나타나고 있다.

등가무중법의 경우 애관의 표면이 충분히 습윤되고 또한 과전 시간이 1분 정도로 짧기 때문에 저오손도, 고전압영역에서 정인무중법의 경우에 생기는 특이한 현상은 나타나지 않았다.

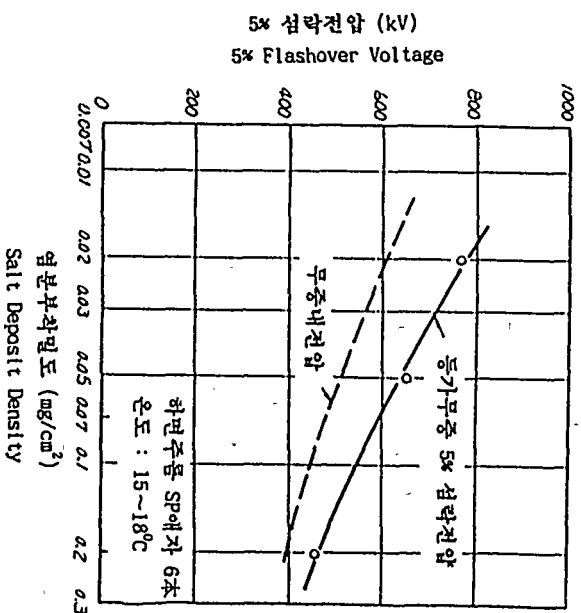


그림 부6.5 하면주름 SP에자의 등가무중내전압

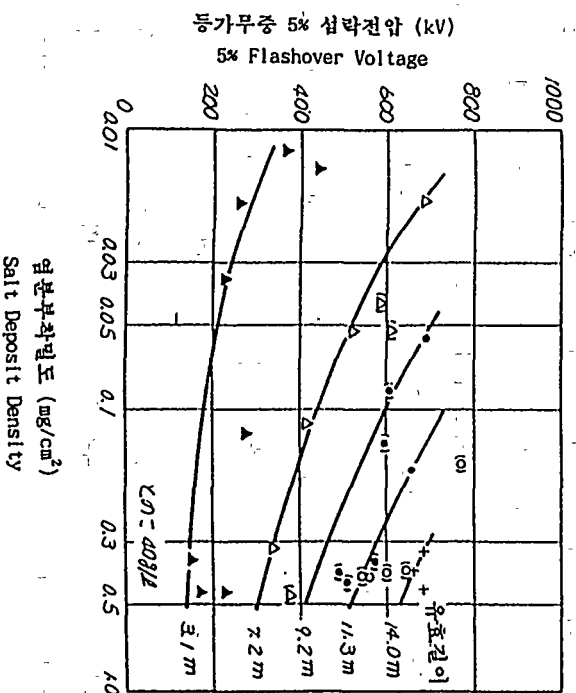


그림 부6.6 UHV 에관의 등가무중내전압

(다) 애저길이의 내전압.

정인무중법에 의한 SP 애자와 UHV 에관의 무중내전압특성을 각각 <그림 부 6.7>에 UHV 에관의 유효길이의 무중내전압의 관계를 <그림 부6.8>에 나타내었다. 이 결과로부터 다음과 같은 것을 알 수 있다

- ① 염분부착밀도 $0.03 \text{ } mg/cm^2$ 정도 이상의 경우에는 애저길이의 무중내전압은 거의 정비례 관계를 나타내었다.
- ② 염분부착밀도 $0.03 \text{ } mg/cm^2$ 이하의 경우 애자의 길이가 길어지면 무중내전압과 애자의 길이사이에 비직선성이 나타났다.

이와같이 애자의 길이가 긴 원추형 애자의 경우 염분부착밀도가 적어지면 무중내전압은 애자의 길이에 비례하는 것이 확실하게 나타났다.

등가무중법에 의한 UHV 에관의 유효길이의와 5% 섬락전압과의 관계를 그림 1.4.9에 나타내었다. 이에 의하면 전압 700kV 정도까지의 범위에서 애관의 유효길이의와 5% 섬락전압간에는 거의 정비례관계가 성립됨을 확인하였다.

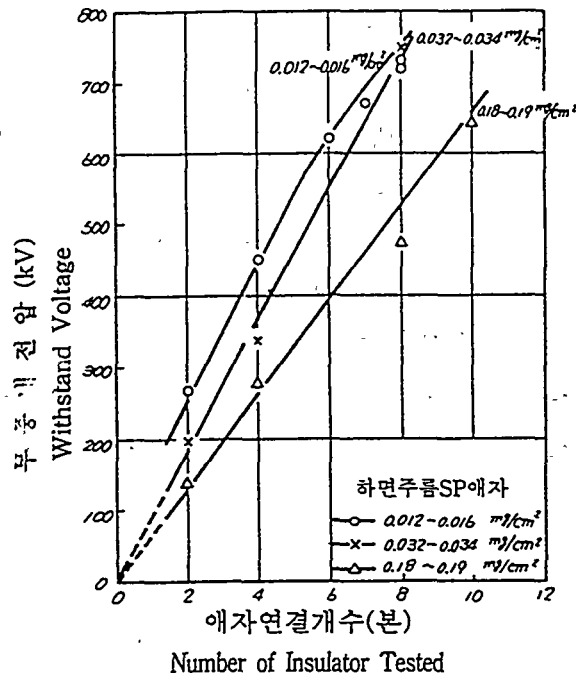


그림 부6.7 하면주름 SP애자의 무중내전압

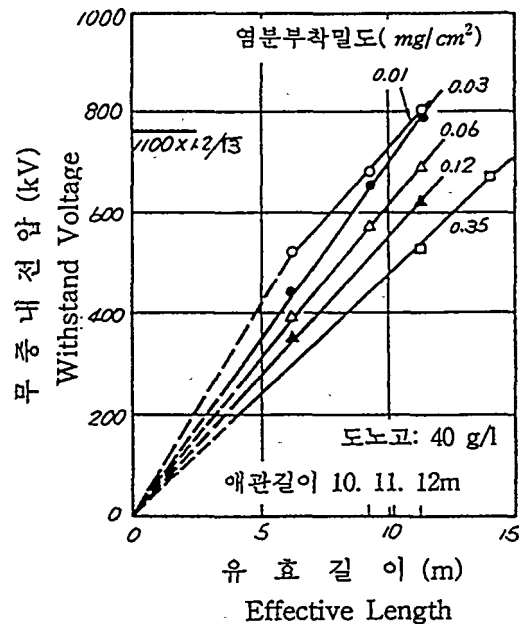


그림 부6.8 정인무중법에 의한 UHV 애관의 유효길이와 내전압

(라) 인공오손시험법과 내전압

이상으로 정인무중법과 등가무중법에 의한 각종 원추형에자의 내전압 특성을 살펴 보았는데 이들 상호간의 특성을 비교해보자. 하면주름 SP에자의 시험결과를 보면 등가무중내전압은 무중내전압보다 15~25% 높으며 이러한 경향은 장간에지의 경우도 같다. 6.7m 에관의 특성을 보면 등가무중내전압은 염분부착밀도가 높은 범위에서 무중내전압에 가까운 값을 나타내고 있는데 비해 염분부착밀도가 낮아짐에따라서 무중내전압보다 높아지는 경향을 가진다. UHV에관의 결과를 <그림 부6.10>에 나타내었는데 그 경향은 6.7m 에자의 경우와 같다.

이상과 같이 2종류의 인공오손법이 에자의 내전압특성에, 미치는 영향은 에자의 종류에 따라 다르다는 것이 판명되었다. 주요한 경향을 추려보면 다음과 같다.

- ① 등가무중내전압이 무중내전압보다 10~25% 정도 높은 경우 : 장간에자나 SP 에자등 직경이 가는 원추형의 에자
- ② 중오손에서 양측의 시험결과가 거의 일치하나 경오손이 되면 등가무중내전압의 편이 높아지는 경우 : 6.7m 에관과 UHV 에관등 직경이 굵은 원추형에자.
- ③ 무중내전압의 편이 등가무중내전압보다 10~40% 정도 높아지는 경우 : 각 중원수에자와 내무에자등 원관형의 에자

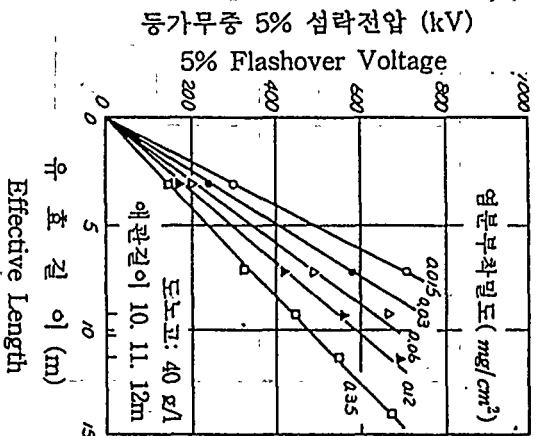


그림 부6.9 등가무중법에 의한 UHV 에관의 유효길이와 내전압의 관계

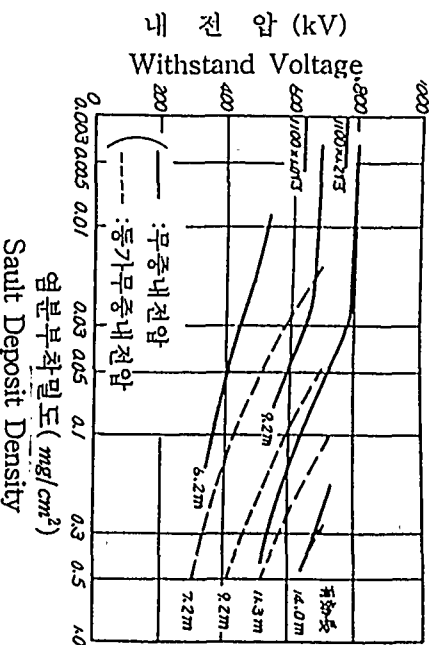


그림 부6.10 UHV 에관의 시험법에 의한 내전압의 비교

위와같은 시험법의 영향이 나타나는 이유로는 정성적인 측면에서 볼때 다음과 같다고 생각된다. 원추형 애자의 동가무중법외의 경우 전압상승중의 누설전류가 직경이 가는 동체부를 애자면에 연하여 균등하게 건조시켜 주기 때문에 애자면 내에 불평등한 습윤조건이 생기기 쉬운 무중법에 비하여 내전압이 높아진다. 한편 현수애자의 경우 무중법에 의한 하면의 습윤이 동가무중법에 비하여 매우 작기 때문에 무중법의 내전압이 높아진다. 또 중요손의 대구경 원추형애자의 경우 위에서의 습윤과 건조조건이 서로 평형이 되기 때문에 양쪽 시험법의 내전압은 같은 정도로 된다.

오손애자의 동가무중 선택전압은 시험시의 온도에 의존되고 온도가 높으면 낮은 선택전압이 얻어지기 쉽다. 한편 증기에 의한 무중내전압은 실험에 적당한 안개의 조건만 있으면 초기온도의 영향을 별로 받지 않는다. 따라서 양 시험법에 의해 내전압을 비교하는 경우는 동가무중 시험시의 온도를 명기할 필요가 있다. 또 이와같은 애자 상호간의 시험법에 의한 크기를 비교할 경우는 동일온도에 의한 동가무중내전압을 이용할 필요가 있다. 여기에서 비교한 동가무중 내전압은 대략 $(15 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ 의 범위의 결과이다.

(마) 원추형 애자의 소요 누설거리

발변전소 기기의 애자로서 일반적으로 사용되고 있는 소위 원추형 애자의 오손설계는 내전압 1kV당 소요누설거리(kV/mm)가 이용되고 있다. 이것은 종래 주로 등가무중법에 의한 시험결과로부터 원추형애자의 내전압이 표면의 누설거리(L)에 비례한다고 생각하면 옳다는 것이 확인 되어있기 때문이다. <그림 부 6.11>에는 정인무중법 및 등가무중법에 의한 UHV 애관의 내전압 1kV당 소요 누설거리와 염분부착밀도와의 관계를 나타내었다. 이것은 앞서 말한 경향을 표현만 바꾸어 재확인 한 것에 지나지 않으나 다음과 같은 경향을 가진다.

- ① 저오손 범위내의 무중내전압에 의한 소요 누설거리는 거의 일정하게 된다.
- ② 염분부착밀도 0.03 mg/cm^2 정도 이상에서 최대특성은 직선으로 근사화 할 수 있으며 그 기울기는 등가무중법에 있어서(1/5)로 거의 일치한다. 또 정인무중법에 의한 소요누설거리가 등가무중법에 의한 누설거리에 비해 크다.

소요누설거리는 누설거리가 섬락에 대하여 유효하게 작용될 때에만 의미가 있는 것이다. 따라서 <그림 부6.11>의 소요누설거리는 염분부착밀도에 따르지 않고 일정치가 되는 범위에서는 절연설계에 소요누설거리를 적용하는 의미가 없다고 생각된다.

SP 애자의 무중내전압 1kV당 소요 누설거리도 UHV 애관과 같이 염분부착밀도가 낮고 애자련의 길이가 긴 경우에는 거의 일정치가 되어 누설거리가 유효하게 작용되지 않게 된다. 그러나 이러한 특수한 경우를 제외하고는 모든 애자의 내전압은 애자련의 길이에 비례하고 염분부착밀도의 증가에 따라 감소하는 특성을 갖는다. 즉 표면의 누설거리가 유효하게 작용하고 있다고 생각 할수 있다. 그래서 다음에 표면누설거리가 유효하게 작용하는 조건하에서 소요 누설거리를 이용한 각종 원추형 애자의 내오손특성을 비교한다.

Leakage Distance Per Unit Withstand Voltage
 단위당 1kV당의 소요누설거리 L/V (mm/kV)

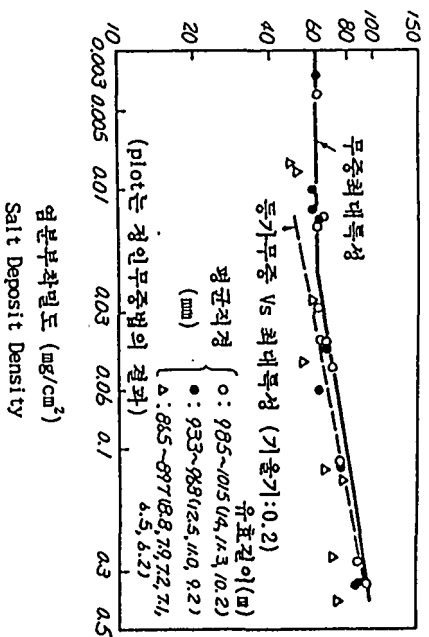


그림 부6.11 정인무중법에 의한 UHV 에관의 소요누설거리

<그림 부6.12>는 장간에자, 하단주를 SP 애저, UHV 애관, 6.7m 애관등의 염분 부착밀도와 무중내전압 1kV당의 누설거리(소요누설거리)와의 관계를 나타낸다.

염분부착밀도가 같은 경우 평균직경이 커지면 소요누설거리도 커져서, UHV 애관의 소요 누설거리는 6.7m 애관의 경우에 비하여 30~35% 정도 커지게 된다. 그러므로 UHV 애관의 유효길이에 대한 누설거리의 비율은 4.27~4.31로서, 6.7m 애관과 비교하여 30% 정도 커지게 된다. 이 때문에 누설거리가 유효하게 작용하는 범위에서는 앞에서 말한바와 같이 UHV 애관의 단위 유효길이당 무중 내전압은 6.7m 애관의 경우와 거의 같은정도의 값이 얻어진다.

이러한 것들은 애관의 경우 도체부의 굵기에 대한 최적의 갯 형상의 선택, 단위 유효길이당의 누설거리를 크게 할 수 있으면, 평균직경이 어느정도 커져도 단위유효길이당 내오손전압을 같은정도로 확보할 수 있음을 보여준다.

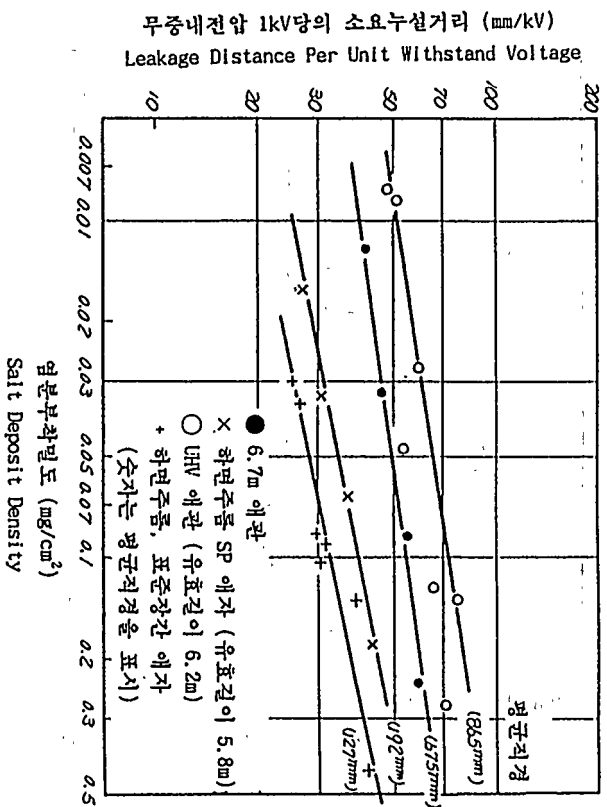


그림 부6.12 각종 원추형 애자의 염분부착밀도와 소요누설거리의 관계

다. 소요 연면누설거리의 검토

(1) 제작회사별 애자의 평균적경 비교

500kV급에 사용되고 있는 NGK사의 애관과 동일한 유효길이의 UHV용 애관의 연면누설거리를 보면 <표 부6.9>와 같이 평균적경의 증가비율이 28%일 때 소요 연면누설거리의 증가비율이 31%로 동일한 내전압을 확보하기 위한 누설거리가 애관적경에 비례하여 증가함을 알 수 있다.

애관의 평균적경과 연면누설거리와의 관계는 IEC 규격에서 권고하고 있는 애관의 직경에 의한 연면누설거리의 보정계수를 살펴보면

- 관의 평균적경이 $D_m < 300mm$: $K_D = 1$
- $300mm < D_m < 500mm$: $K_D = 1.1$
- $D_m > 500mm$: $K_D = 1.2$

로서 최소 정격 연면누설거리는 <표 부6.5>의 최소연면누설거리에 상간 계통최고전압과 보정계수를 곱하여 산출한다.

한편 <표 부6.10>와 같이 765kV 붓싱을 제작하고 있는 ABB사의 붓싱의 연면누설거리를 비교하여보면 애관의 평균직경이 600mm 정도로서 NGK사의 애관에 비하여 연면 누설거리가 훨씬 적음을 알 수 있다. ABB사는 IEC 규격에 따라 중오손지역(Medium)의 기준인 20mm/kV로 표준품을 제작하고 있으며 그 이상의 오손등급에 필요한 붓싱은 주문제작 하여야 한다.

표 부6.9 평균직경과 연면누설거리 (애자요람, 1988, NGK)

전압 계급	적용구분 mg/cm^2	전장 [mm]	평균직경 [mm]	누설거리 [mm]	목표내전압 [kV]	비고
500kV	경오손 (0.03이하)	5,400	675	15,850	364	
	중오손 (~0.06이하)	6,700 (6,250)	675	20,400	364	
UHV	---	(6,200)	865	26,700	---	

표 부6.10 ABB사 붓싱의 평균직경과 연면누설거리

전압 계급	전장 [mm]	평균직경 [mm]	누설거리 [mm]	목표내전압 [kV]	비고
765kV	(4,725)	600	15,060	$(765kV/\sqrt{3})$ = 442	BIL : 1,950 BSL : 1,360
	(5,220)	600	16,630	$(765kV/\sqrt{3})$ = 442	BIL : 2,100 BSL : 1,425
	(5,720)	600	18,320	$(765kV/\sqrt{3})$ = 442	BIL : 2,550 BSL : 1,550
	(6,210)	600	20,000	$(765kV/\sqrt{3})$ = 442	BIL : 2,550 BSL : 1,600

(2) 고창 실증시험장에 사용된 붓상의 연면 누설거리 현황

참고로 고창 실증시험장에 사용중인 붓상의 연면누설거리를 살펴보면 계통최고전압 800kV일때 25mm/kV 정도이다. 고창 시험선로에서 현재까지 자동오손측정장치를 이용하여 측정된 오손등급은 우리나라 기준으로 B지구(ESDD 0.125 mg/cm^2)에 해당되는 것으로 나타났으며 이는 해안에서의 이격거리에 따른 판정기준에 의한 D지구 보다는 2등급이 낮은 수치이다.

표 부6.11 고창 실증시험장에 사용된 붓상의 연면 누설거리 현황

최고운전전압 [kV]	적용구분	연면누설거리 [mm]	1kV당소요길이 [mm]	비 고
850	Medium	20,000	23.5	변압기 붓상
850	Medium	19,300	22.7	CVT 애관

(3) 전압계급별 1 kV당 소요 연면누설거리 비교

현재의 362kV계통 및 765kV 계통의 1kV당 소요연면 누설거리를 보면 <표 부6.12>와 같다.

표 부6.12 전압계급별 1kV당 소요 연면누설거리 비교

계통최고전압 [kV]	적용구분	연면누설거리 [mm]	1kV당소요길이 [mm]	비 고
362	Medium	5,588	15.4	ANSI
550	Medium	8,077	주(1) 22.3	ANSI
362	Medium	7,240	20.0	IEC
420	Medium	8,400	20.0	IEC
550	Light	15,840	28.8	일 본
550	Medium	20,400	37.1	일 본
765	Medium	18,360	24.0	IEC
800	Medium	19,200	24.0	IEC
800	Moderate	12,319	15.4	ANSI
800	Moderate	17,850	주(2) 22.3	362kV 규격의 선형확대적용시

주) 362kV급의 IEC규격 연면누설거리는 Creepage Factor를 고려하지 않은 것임.

(4) 외국 800kV급 붓싱의 절연레벨 비교

외국에서 사용중인 800kV급 붓싱 및 변압기의 절연레벨을 <표 부6.13> 및 <표 부6.14>에 표시 하였다.

표 부6.13 차단기붓싱, CVT애관의 절연레벨 비교

국 가 명	계통최고 전압[kV]	BIL[kV]	마 진	BSL [kV]	마 진	비 고
미 국 (NYPA)	800	2,050				ANSI
카 나 다 (HQ)	765	2,100	22.0	1425	25.0	IEC
남 아 공 (ESKOM)	800	2,100				IEC 옥내 : 2100 옥외 : 2400
		2,400				
한 국 (KEPCO) (안)	800	2,100	0.04	1,425	21.1	IEC
		2,250	11.7	1,550	31.8	
		2,400	19.1	1,675	42.4	

표 부6.14 변압기의 절연레벨 비교

국 가 명	계통최고 전압[kV]	BIL[kV]	마 진	BSL [kV]	마 진	비 고
미 국 (NYPA)	800	1,800 (2,050)		1,360		ANSI
카 나 다 (HQ)	765	1,950	38.0	1,550	36.0	IEC
남 아 공 (ESKOM)	800	1,950				IEC
한 국 (KEPCO) (안)	800	1,800	0.05			ANSI
		1,925	12.2			
		2,050	19.5	1,500		

주) 1. 마진 = $\frac{BIL - STRESS}{STRESS}$

2. BIL에 대한 STRESS = 1,715 kV (변압기), 2,015 kV (차단기, 붓싱)

3. BSL에 대한 STRESS = 1,176 kV (변압기, 차단기, 붓싱)

바. 800kV 붓싱의 전기적 절연특성(안)

캐나다의 HQ 이외에는 절연계급에 대한 마진을 알 수가 없으나 캐나다와 동등한 수준의 보호레벨의 마진을 고려하여 변압기용 붓싱, 차단기 및 계측장치용 붓싱의 절연특성(안)을 작성하였다. 소요 연면누설거리는 IEC 규격에 따라 Creepage Factor를 고려하면 $800 \times 1.2 \times 20 = 19,200\text{mm}$ 가 되고 이것은 현재 362kV 변압기용 붓싱의 소요, 연면누설거리 22.3mm/kV 보다 약간 높은 24.0mm/kV 수준으로 우리나라 오손지역구분상의 B 지구(0.12 mg/cm^2) 이하의 조건에서는 충분할 것으로 생각된다.

표 부6.15 800kV 붓싱의 전기적 절연특성(안)

계통 최고전압 [kV]	BIL [kV]	BSL [kV]	최소연면 누설거리 [mm]	내 전 압 시 험		
				60Hz 전조 1분간 [kV]	뇌임펄스 (전파) [kV]	주 개 폐 임 펄스 [kV]
800	2,250	1,500	19,200	800	2,250	1,500

부록 7. 변전소차폐의 검토

가. 개 요

옥외철구형의 변전소에서는 변전소의 차폐를 검토하여 차폐실패가 일어나지 않도록 하여야 하나 개스절연변전소에서는 옥외에 노출된 부분이 없으므로 차폐 실패에 의한 섬락고장은 일어나지 않으며 GIS의 엔크로저에 직격되어도 가스에 의해 충분히 절연이 되므로 섬락고장은 없을 것으로 판단된다. 그러나 송전선에서 가스절연부제로의 인입점과 인출점은 옥외형이므로 이에 대한 검토가 필요하다. 본 검토에서는 우선 옥외철구형 변전소의 뇌격차폐에 대한 이론적인 검토를 하고 변전소 전체를 차폐할 경우와 실질적으로 필요한 송전선 인입부등의 차폐에 대하여 검토하였다. 검토결과 별도의 철구나 차폐선의 설치 없이 765kV송전선 인입구 및 345kV 송전선 인출구의 차폐가 가능한 것으로 나타났다.

나. 이론적인 접근

(1) 임계 뇌격전류의 선정

먼저 설계과정에 앞서, 변전소 Bus나 장비들에 떨어질 낙뢰와 같거나 그 이상의 임계 뇌격전류를 구해야 한다. 송전선에서 적용하는 관계식을 보면 다음과 같다.

$$I_c = \frac{2 \times CFO^-}{Z_c} \quad (\text{부7.1})$$

I_c : the stroke current

CFO^- : negative polarity of tower insulation

Z_c : conductor surge impedance

같은 식에서 변전소 차폐에 적용하기 위하여는 Z_c 를 bus surge impedance로

정의하여 사용한다. 그러나, 몇 가지 문제점은, bus에 낙뢰가 떨어졌을 때에는 다음의 전압을 발생시킨다.

$$V = I_c \times \frac{Z_c}{2}$$

그러나, 변전소내의 피뢰기는 뇌격이 가해진 지점에서 피뢰기까지의 거리에 비례하는 만큼 이 전압을 감소시킨다. 그래서, bus의 실제전압은 V와 뇌격전류 I_c 에서의 피뢰기 방전전압사이의 범위에 있다.

예를 들어, 345kV 변전소를 보면, 모선지지에자는 1,300kV의 CFO를 가진다. Z_c 를 340Ω이라 하면, <식 부7.1>에 의해 7.4kA를 얻는다. 반면에, 345kV에 사용된 피뢰기를 통하여 10kA의 전류가 흐르면 600kV의 방전전압이 생기고, 40kA의 전류에서는 700kV의 방전전압이 생긴다. 이는 모선 절연의 CFO보다 훨씬 낮은 값이다.

위에서, 임계전류의 선택은 다소 임의적으로 선택되어 사용되며, 낮은 등급(230kV 이하)에서는 5kA가 임계 뇌격전류로 적용되고, 345kV이상에서 10kA가 적용된다.

(2) 차폐선에 의한 차폐

두 가닥의 차폐선에 의한 보호영역의 개념을 <그림 부7.1>에서 보여준다.

두 가닥의 차폐선이 멀리 떨어져 있다면, <그림 부7.1>과 같이, 보호영역은 같은 거리 a에서는 각각의 차폐선으로부터 그 크기가 같게 된다.

$$a = \sqrt{r_c^2 - (r_g - h)^2} = \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} \quad (\text{부7.2})$$

이때, 차폐선을 더 가깝게 가져올 때, 뇌격 거리로 정의된 r_c 인 두개의 호는 서로 결합되어 교차점의 높이는 r_g 보다 높게된다. 그러므로, 차폐선사이의 보호

영역은 <그림 부7.2>에서와 같이 교차점으로부터 반경이 r_c 인 호로 나타내어진
다. 그러므로 수평거리 a_c 는 보호될 장비의 같은 높이 h 에서 a 보다 더 크게 된
다. 역시, 최소로 보호되어야 할 높이 y_{mc} 는 존재한다.

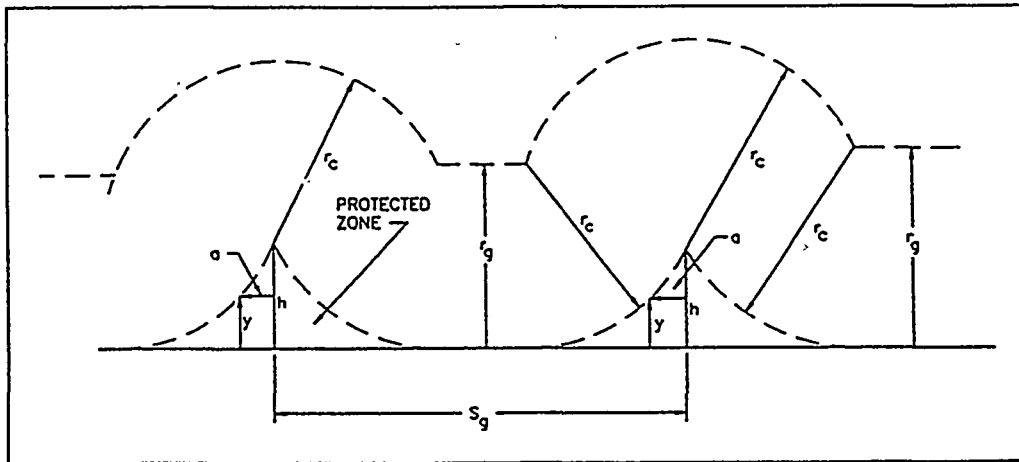


그림 부7.1 충분히 떨어져 있는 2조의 차폐선에 의한 보호영역

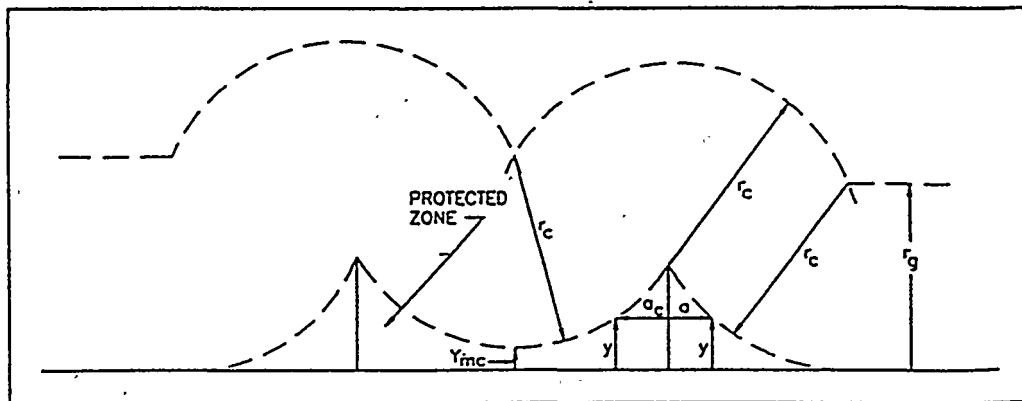


그림 부7.2 2조의 차폐선이 근접했을 때 보호영역

차폐선 사이의 보호영역을 서술하기 위한 식을 만들기 전에, 차폐선과 도체 (또는 보호되어야할 목적물)로부터 뇌격거리를 고려해서 약간의 수정이 필요하다. 송전선에서는 차폐선의 높이 h 와 상도체의 높이 y 는 별 차이가 없다. 그러므로, 뇌격거리 r_c 는 도체와 차폐선에 동시에 적용된다고 가정한다. 변전소 보호에서는 이 가정이 유효하지가 않는다. 그러므로, 세개로 구분된 뇌격거리가 필요하다. ; r_s 는 차폐선까지, r_c 는 보호되어야할 목적물까지, r_g 는 접지면까지.

$$\begin{aligned} r_s &= \gamma_s \times r_g \\ r_c &= \gamma_c \times r_g \end{aligned} \quad (\text{부7.3})$$

여기서 γ_s 와 γ_c 는 1보다 크다.

예를 들어, young's equation에서 사용된다면:

$$\begin{aligned} r_s &= \frac{444}{462-h} \quad \text{for } h > 18 \text{ meters} \\ r_c &= \frac{444}{462-y} \quad \text{for } y > 18 \text{ meters} \end{aligned} \quad (\text{부7.4})$$

단, $h < 18 \text{ meters}$ 에서는 $\gamma_s = 1.0$ 이고, 역시 $y < 18 \text{ meters}$ 에서 $\gamma_c = 1.0$ 이다.

(가) 차폐선의 외부 보호영역

<그림 부7.3>에서 보는 것처럼, 차폐선의 외부 보호영역은 수평거리 a 에서 접선으로 표시된 부분으로 나타난다. 그 식은 아래와 같다.

$$a = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} \quad (\text{부7.5})$$

$y=0$ 에서 $a=a_0$ 라 하면(접지면에 점선이 닿은 면) <식 부7.6>과 같이 되고,

$$a_0 = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \quad (\text{부7.6})$$

“보호반경” R_{p0} 는 <식 부7.7>과 같이 된다.

$$R_{p0} = a_0 - a = \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} \quad (\text{부7.7})$$

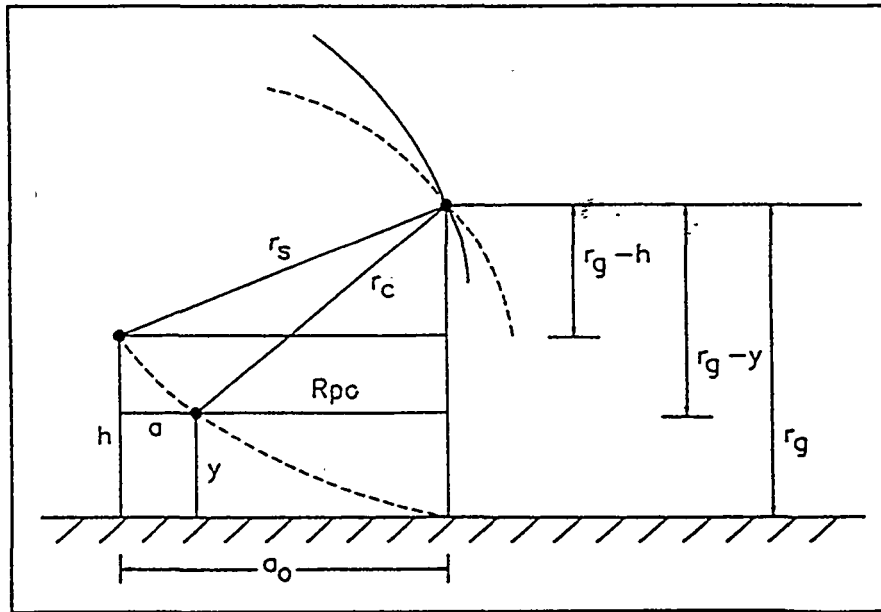


그림 부7.3 차폐선의 외부 보호영역

(나) 두 차폐선 사이에서의 보호영역

두 차폐선 사이에서의 보호영역은 <그림 부7.4>에서 보여주는 것처럼 수평거리 a_c 또는 R_{pc} 에 의해 설명된다. 그림으로부터

$$R_{pc} = \sqrt{r_c^2 - \left(h - y + \sqrt{r_s^2 - \left(\frac{S_g}{2} \right)^2} \right)^2} \quad (\text{부7.8})$$

$$a_c = \left(\frac{S_g}{2} \right) - R_{pc} \quad (\text{부7.9})$$

여기서 S_g 는 두 차폐선사이의 이격거리이다.

$S_g/2$ 에서의 최소 보호높이 y_{mc} 는 $R_{pc}=0$ 일때 식 또는 그림에서 얻어진다.

$$y_{mc} = h - r_c + \sqrt{r_s^2 - \left(\frac{S_g}{2} \right)^2} \quad (\text{부7.10})$$

윗 식은 특정한 높이 y_{mc} 에서 요구되는 차폐선의 높이를 결정하는데 사용된다.

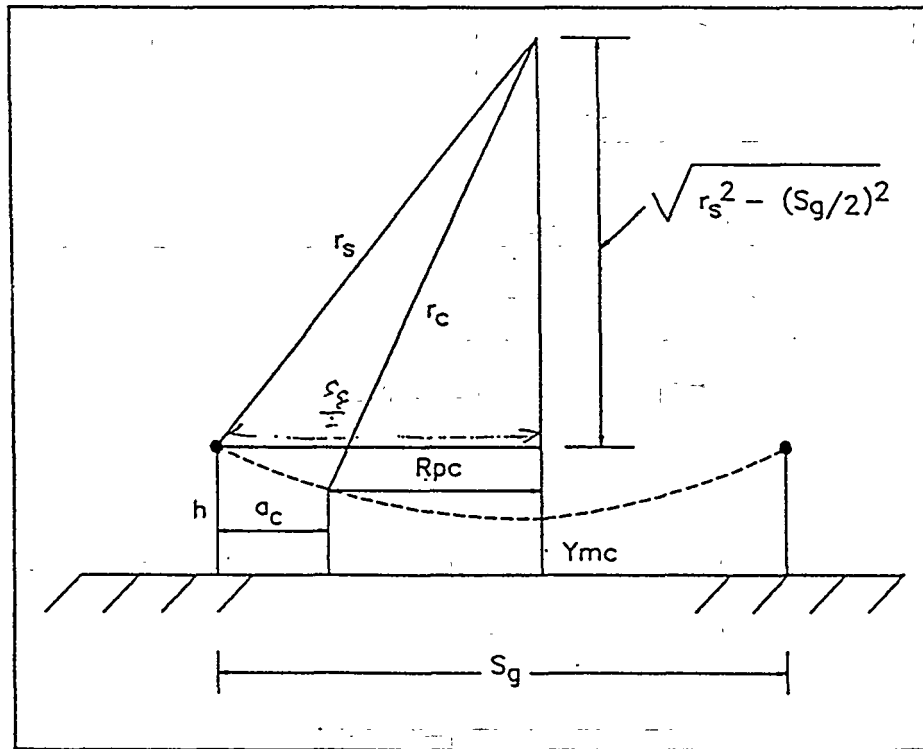


그림 부7.4 두 차폐선 사이에서의 보호영역

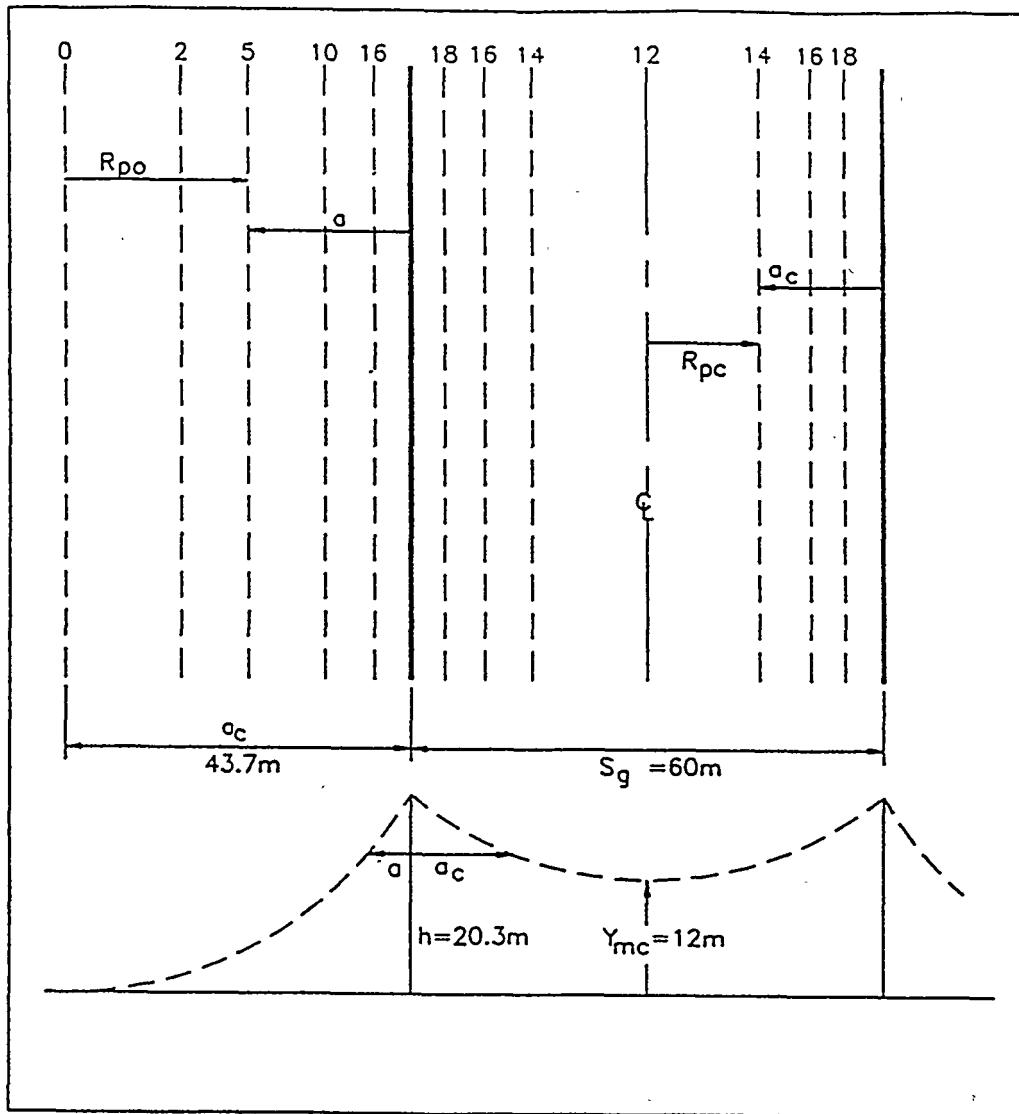


그림 부7.5 보호영역

<그림 부7.5>에서 알 수 있는 것은, 차폐선을 중심으로 같은 높이의 보호영역 인데도 방향에 따라 그 거리가 달라진다. 즉 두 차폐선 사이에서의 보호높이가

같은 거리에서의 바깥쪽에서의 보호높이보다 상대적으로 높음을 알 수 있다.

다. 실제적용 계산치

(1) $h = 50$ [m]를 기준으로 했을때

(차폐선을 새로운 철구에 의해 50 [m] 높이로 설치했을 때)

(식 부7.1)의 $I_c = \frac{2 \times CFO}{Z_c}$ 에서 각 변수들을 먼저 구한다.

그중 CFO를 구하는 방법중 대표적인 두 가지 식을 사용하여 CFO를 구하면 아래와 같다.

$$CFO = 605 \text{ [kV]} \times d \text{ [m]} = 605 \text{ [kV]} \times 6 \text{ [m]} = 3,630 \text{ [kV]}$$

$$CFO_{JAPAN} = 550 \text{ [kV]} \times d \text{ [m]} + 80 \text{ [kV]} = 3,380 \text{ [kV]}$$

그리고, $Z_c = 350 \text{ }[\Omega]$ 라고 가정하면, 식 1로부터 각각 다음의 값을 구할 수 있다.

$$I_c = \frac{2 \times 3,630}{350} = 20.7 \text{ [kA]}$$

$$I_c = \frac{2 \times 3,380}{350} = 19.3 \text{ [kA]}$$

그러므로 이 두 값을 평균내면 $I_c \approx 20 \text{ [kA]}$ 가 된다.

다음으로, 식 3에서 도체에의 뇌격거리(r_s)를 계수(γ_s)에 대지에의 흡입거리(r_g)를 곱해서 구하면 다음과 같다.

$$\text{대지에의 흡입거리 : } r_g = 27 \times I_c^{0.32} = 27 \times 20^{0.32} = 70.423 \text{ [m]}$$

$$\text{계수 : } \gamma_s = \frac{444}{462 - h} = \frac{444}{462 - 50} = 1.078$$

$$\text{뇌격거리 : } r_s = \gamma_s \times r_g = 1.078 \times 70.423 = 75.9 \text{ [m]}$$

그러므로, $I_c \approx 20 \text{ [kA]}$ 일때 $r_g = 70.423 \text{ [m]}$ 와 $r_s = 75.9 \text{ [m]}$ 가 된다.

또, 원하는 높이 h 에서의 r_c 를 구하기 위해서는, 변전소내 설치할 내용물들의 높이인 y 가 18 [m] 를 넘지 않기 때문에 계수(γ_c)를 1로 두고 r_c 를 구하면 다음과 같다.

$$\text{흡입거리 : } r_g = 27 \times I_c^{0.32} = 27 \times 20^{0.32} = 70.423 \text{ [m]}$$

$$\text{계수 : } \gamma_c = 1.0$$

$$\text{뇌격거리 : } r_c = \gamma_c \times r_g = r_g = 70.423 \text{ [m]}$$

그러므로, 역시 $r_c = 70.423 \text{ [m]}$ 가 된다.

따라서, 차폐선의 높이 $h = 50 \text{ [m]}$ 일 때 식 10으로부터 y_{mc} 를 구하면 다음을 얻을 수 있다.

$h = 50 \text{ m}$ 이고, 두 차폐선의 거리(S_g)를 140 [m] 라 하면,

$$\begin{aligned} y_{mc} &= h - r_c + \sqrt{r_s^2 - \left(\frac{S_g}{2}\right)^2} \\ &= 50 - 70.423 + \sqrt{75.9^2 - \left(\frac{140}{2}\right)^2} = 8.9 \text{ [m]} \end{aligned}$$

여기서, 차폐선의 가장 가혹한 조건인 다설지역에서의 $\text{dip}=1.0 \text{ [m]}$ 를 고려하더라도 변전소내의 지형물을 차폐 가능한 높이인 $y_{mc} = 8.9 \text{ [m]}$ 가된다.

구체적으로, <그림 부7.5>와 같이 차폐선으로부터 각각 a , a_c 만큼 떨어진 지점에서의 보호영역 높이 y 를 구하여 보면 다음과 같다.

(가) 바깥쪽 방향으로

먼저 차폐선에서 바깥쪽 방향으로의 거리 a 에 대해서 보호높이 y 를 구하는 식을 찾아본다. (식 부7.5)로부터 구하면 다음과 같다.

$$a = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2}$$

$$\sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} - a$$

$$r_c^2 - (r_g - y)^2 = \{ \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} - a \}^2$$

$$(r_g - y)^2 = r_c^2 - \{ \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} - a \}^2$$

$$r_g - y = \sqrt{r_c^2 - \{ \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} - a \}^2}$$

$$y = r_g - \sqrt{r_c^2 - \{ \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} - a \}^2} \quad (\text{부7.11})$$

<식 부7.11>에 등간격의 a를 넣어 y를 구하여 보면 다음과 같다.

$$a = 10 \text{ [m]} \text{ 일 때, } y = 39.15 \text{ [m]}$$

$$a = 20 \text{ [m]} \text{ 일 때, } y = 24.17 \text{ [m]}$$

$$a = 30 \text{ [m]} \text{ 일 때, } y = 14.73 \text{ [m]}$$

$$a = 40 \text{ [m]} \text{ 일 때, } y = 8.26 \text{ [m]}$$

$$a = 50 \text{ [m]} \text{ 일 때, } y = 3.89 \text{ [m]}$$

$$a = 60 \text{ [m]} \text{ 일 때, } y = 1.23 \text{ [m]}$$

$$a = 70 \text{ [m]} \text{ 일 때, } y = 0.07 \text{ [m]}$$

(나) 두 차폐선 사이의 방향으로

다음으로 두 차폐선 사이에서의 거리 a_c 에 대해서 보호높이 y를 구하는 식을 찾아본다. <식 부7.8>로부터 구하면 다음과 같다.

$$y = h + \sqrt{r_s^2 - \left(\frac{S_g}{2}\right)^2} - \sqrt{r_c^2 - \left(\frac{S_g}{2} - a_c\right)^2} \quad (\text{부7.12})$$

<식 부7.12>에 등간격의 a_c 를 넣어 y 를 구하여 보면 다음과 같다.

$a = 10$ [m] 일 때, $y = 42.47$ [m]

$a = 20$ [m] 일 때, $y = 29.75$ [m]

$a = 30$ [m] 일 때, $y = 21.38$ [m]

$a = 40$ [m] 일 때, $y = 15.63$ [m]

$a = 50$ [m] 일 때, $y = 11.82$ [m]

$a = 60$ [m] 일 때, $y = 9.63$ [m]

$a = 70$ [m] 일 때, $y = 8.92$ [m]

위에서 구한 값들을 표로 나타낸 것이 <표 부7.1>이고, <그림 부7.5>와 같이 표현한 것이 <그림 부7.6>이 된다.

표 부7.1 차폐선을 기준으로 한 각 지점에서의 보호높이

차폐선으로부터의 거리 (a 또는 a_c)	차폐선 외부로의 보호높이 (m)	두 차폐선 사이의 보호높이 (m)
10 [m]	39.15 [m]	42.47 [m]
20 [m]	24.17 [m]	29.75 [m]
30 [m]	14.73 [m]	21.38 [m]
40 [m]	8.26 [m]	15.63 [m]
50 [m]	3.89 [m]	11.82 [m]
60 [m]	1.23 [m]	9.63 [m]
70 [m]	0.07 [m]	8.92 [m]

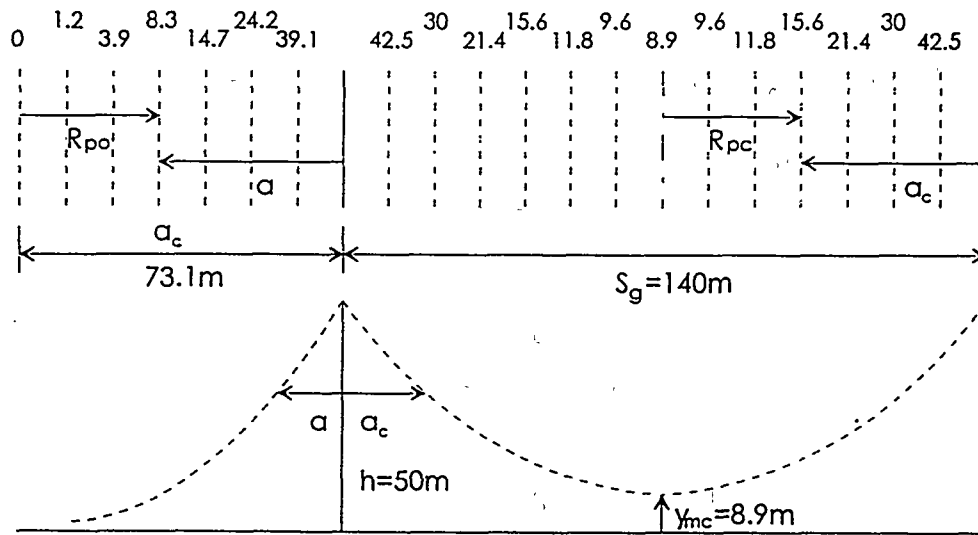


그림 부7.6 예상 보호영역

(2) $h = 30$ [m]를 기준으로 했을때

(인입철구의 차폐선을 그대로 사용했을 때)

$$I_c \approx 20 \text{ [kA]}$$

$$\text{대지에의 흡입거리 : } r_g = 27 \times I_c^{0.32} = 27 \times 20^{0.32} = 70.423 \text{ [m]}$$

$$\text{계수 : } \gamma_s = \frac{444}{462 - h} = \frac{444}{462 - 30} = 1.028$$

$$\text{뇌격거리 : } r_s = \gamma_s \times r_g = 1.028 \times 70.423 = 72.4 \text{ [m]}$$

그러므로, $I_c \approx 20$ [kA] 일때 $r_g = 70.423$ [m] 와 $r_s = 72.4$ [m] 가된다.

$$\text{흡입거리 : } r_g = 27 \times I_c^{0.32} = 27 \times 20^{0.32} = 70.423 \text{ [m]}$$

$$\text{계수 : } \gamma_c = 1.0 \text{ (y가 18 [m]를 넘지 않기 때문에)}$$

뇌격거리 : $r_c = \gamma_c \times r_g = r_g = 70.423 \text{ [m]}$

그러므로, 역시 $r_c = 70.423 \text{ [m]}$ 가 된다.

차폐선으로부터 a 만큼 떨어진 지점에서의 보호영역 높이 y를 구하여 보면 다음과 같다. 구하는 식은 <식 부7.11>이다.

$$y = r_g - \sqrt{r_c^2 - \{ \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} - a \}^2} \quad (\text{부7.11})$$

<식 부7.11>에서 내부 물체가 설치 예상되는 지점(a)에서의 각 보호높이(y)를 구하여 보면 다음과 같다.

a = 5 [m] 일 때, y = 26.52 [m]

a = 15 [m] 일 때, y = 16.30 [m]

a = 19 [m] 일 때, y = 13.21 [m]

a = 35 [m] 일 때, y = 4.61 [m]

a = 53 [m] 일 때, y = 0.35 [m]

(3) h = 15 [m]를 기준으로 했을때

(345kV 모선측 가공 인출부분을 그대로 사용)

$$I_c \approx 20 \text{ [kA]}$$

대지에의 흡입거리 : $r_g = 27 \times I_c^{0.32} = 27 \times 20^{0.32} = 70.423 \text{ [m]}$

계수 : $\gamma_s = 1.0$ (h가 18 [m]보다 적기 때문에)

뇌격거리 : $r_s = \gamma_s \times r_g = 1.0 \times 70.423 = 70.423 \text{ [m]}$

그러므로, $I_c \cong 20$ [kA] 일 때 $r_g = r_s = 70.423$ [m] 가된다.

$$\text{흡입거리 : } r_g = 27 \times I_c^{0.32} = 27 \times 20^{0.32} = 70.423 \text{ [m]}$$

계수 : $\gamma_c = 1.0$ (y가 18 [m]보다 적기 때문에)

$$\text{뇌격거리 : } r_c = \gamma_c \times r_g = r_g = 70.423 \text{ [m]}$$

그러므로, 역시 $r_c = r_g = r_s = 70.423$ [m]가 된다.

차폐선으로부터 a 만큼 떨어진 지점에서의 보호영역 높이 y를 구하여 보면 다음과 같다.

<식 부7.11>에서 각 지점(a)에서의 각 보호높이(y)를 구하여 보면 다음과 같다.

$$a = 5 \text{ [m] 일 때, } y = 11.42 \text{ [m]}$$

$$a = 10 \text{ [m] 일 때, } y = 8.45 \text{ [m]}$$

$$a = 20 \text{ [m] 일 때, } y = 4.02 \text{ [m]}$$

$$a = 30 \text{ [m] 일 때, } y = 1.30 \text{ [m]}$$

$$a = 40 \text{ [m] 일 때, } y = 0.08 \text{ [m]}$$

라. 뇌격 확률

IKL 20지역에는 평균 2회/km²/년의 비율로 대지뇌격이 있고 변전소부지 (270 m × 430 m = 0.1161 [km²]) 의 면적에는 0.2322회/년의 뇌격이 예상되며, 그 중에서 차폐실패를 일으키는 20kA 미만인 뇌격의 회수를 20%로 보면 뇌격 확률 P는

$$P = 0.2322 \times 0.2 = 0.046 \text{ 회/년}$$

이 된다. 즉, 21.53년에 1회의 뇌격이 변전소에 침입할 가능성이 있다. 그러나 이는 변전소 전체 면적에 1회의 뇌격을 의미하므로 변전소 전체기기들 중에 GIS 인입용 붓상에 직접 뇌격될 확률은 없다.

부록 8. GIS의 크기와 선로정수

변전소 침입써지 해석시 GIS의 크기가 해석결과에 미치는 영향을 알아보기 위해 국산화개발중인 GIS 차단부를 기본으로 하여 정격통전전류 8,000[A]까지의 GIS모선을 가정하여 계산 하였다. 계산결과 써지해석시에 산정한 선로정수는 적정한 범위로 산정되었음을 확인 하였다. 도체와 외함(엔크로저)의 크기 변화에 따른 인덕턴스, 정전용량, 써지임피던스의 변동 범위를 수계산 결과와 EMTP를 이용한 계산 결과를 상호 비교 하였다. 또한 침입써지의 주파수범위에 따른 영향을 확인하기 위하여 주파수를 60Hz~1,000kHz로 변화시켜 계산하였다. <그림 부8.1>은 계산에 사용된 GIS의 단면도이다.

가. 단심케이블의 인덕턴스 계산식

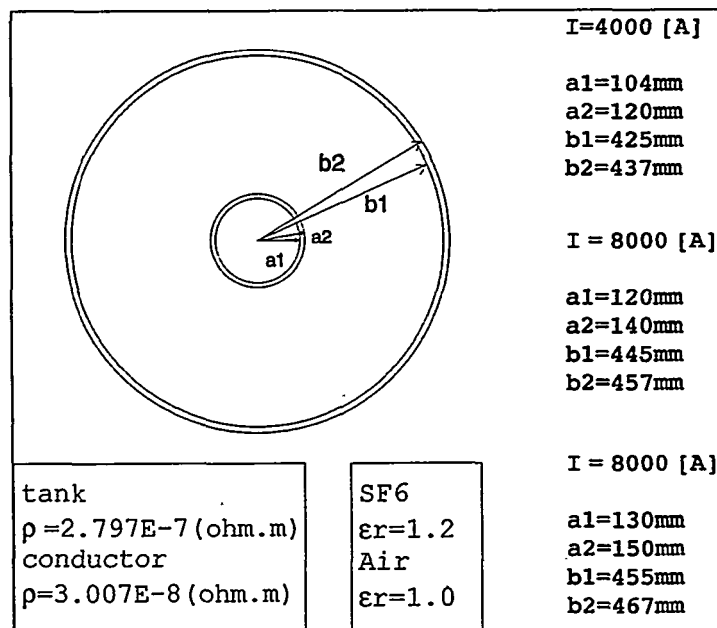


그림 부8.1 GIS도체와 외함의 크기

GIS를 동축원상의 상분리형의 인덕턴스로 표현하면 (전력수송 : 酒井洋, 1961, 32~33쪽 참조) 다음의 수식으로 된다.

$$\begin{aligned}
 L &= L_1 + L_2 + L_3 \\
 &= s \left(\frac{1}{2} + 2 \ln \frac{b_1}{a_2} + \frac{b_2^4}{b_2^2 - b_1^2} \ln \frac{b_2}{b_1} + \frac{1}{2} \frac{b_2^2 - 3b_1^2}{b_2^2 - b_1^2} \right) \\
 &\quad \times 10^{-4} [H]
 \end{aligned}$$

여기서 쉬스의 두께를 무시하면

$$\begin{aligned}
 L &= s \left(\frac{1}{2} + 2 \ln \frac{b_1}{a_2} \right) \times 10^{-4} [H] \\
 &= 0.05 + 0.2 \ln \frac{b_1}{a_2} [mH/km] \\
 &= 0.05 + 0.2 \ln \frac{0.425}{0.120} [mH/km] \\
 &= 0.3029 [mH/km] = 0.3029 [\mu H/m]
 \end{aligned}$$

위의 수식과 EMTP에 의한 계산결과를 <표 부8.1>에 비교하였다.

표 부8.1 800kV GIS의 인덕턴스

도체크기	수계산	EMTP	비 고
b1=0.425 [m] a1=0.120 [m]	0.3029 [uH/m]	0.265 [uH/m]	GIS1.DAT GIS4.DAT
b1=0.445 [m] a1=0.140 [m]	0.3029 [uH/m]	0.251 [uH/m]	GIS2.DAT GIS5.DAT
b1=0.455 [m] a1=0.150 [m]	0.3029 [uH/m]	0.233 [uH/m]	GIS3.DAT GIS6.DAT

나. 단심케이블의 정전용량 계산식

GIS를 단심케이블로 보고 정전용량을 계산하여보면, 등축원상의 상분리형의 정전용량은 시스의 반경을 b_1 , 도체의 반경을 a_2 라 하면 다음의 식으로 표현된다.(전력수송 : 酒井洋, 昭和36년, 71쪽 및 최신송배전공학 : 박영문의외5인, 荷山出版社, 45쪽 참조)

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{b_1}{a_2}} = \frac{0.02413\epsilon}{\log_{10} \frac{b_1}{a_2}} [uF/km]$$

여기서 ϵ 은 유전율

$$\begin{aligned}\epsilon_0 &= \frac{1}{u_0 \cdot c^2} = \frac{1}{(4\pi \times 10^{-7}) \times (3 \times 10^8)^2} \\ &= \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8.842 \times 10^{-12} \\ \mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} [H/m]\end{aligned}$$

<그림 부8.1>의 계산예를 보면

$$\begin{aligned}C &= \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{b_1}{a_2}} = \frac{0.02413\epsilon}{\log_{10} \frac{b_1}{a_2}} [uF/km] \\ &= \frac{0.02413 \times 1.0}{\log_{10} \frac{0.425}{0.120}} = 0.0439 [uF/km] \\ &= 0.439 \times 10^{-3} [uF/m] = 43.9 \times 10^{-6} [uF/m] \\ &= 43.9 [pF/m]\end{aligned}$$

$$EMTP \text{ 계산결과} = 43.04 \times 10^{-12} [F/m] = 43.04 [pF/m]$$

다. 단심케이블의 써지임피던스 계산식

동축원상의 상분리형의 정전용량은 시스의 반경을 b_1 , 도체의 반경을 a_2 라 하면 다음의 식으로 표현된다.

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{b_1}{a_2}} = \frac{55.6}{\ln \frac{b_1}{a_2}} [pF/m]$$

여기서 $b_1 = 0.425m$, $a_2 = 0.12m$ 일 때

여기서 ϵ_0 는 진공의 유전율

$$Z = \frac{1}{v \cdot C_0} = 60 \times \ln \frac{b_1}{a_2} [ohms]$$

$$Z = 75.82 [Ohms] \quad \dots\dots\dots v = 3.00E8 [m/sec] \text{일 때} \\ (C_0 = 43.966 E-12 [F/m])$$

$$Z = 84.24 [Ohms] \quad \dots\dots\dots v = 2.70E8 [m/sec] \text{일 때} \\ (C_0 = 43.966 E-12 [F/m])$$

$$Z = 83.01 [Ohms] \quad \dots\dots\dots v = 2.74E8 [m/sec] \text{일 때} \\ (C_0 = 43.966 E-12 [F/m])$$

<표 부8.2>에 수계산과 EMTP에 의한 계산값을 비교 정리 하였다.

표 부8.2 EMTP계산과 수계산의 비교

CASE명	진행속도[v]	정전용량[c]	써지임피던스(Ohms)	
	* E8[m/sec]	[F/m]	수계산	EMTP
GIS4.DAT	2.74	52.68 E-12	69.27	70.77
GIS5.DAT	"	57.60 E-12	63.36	63.54
GIS6.DAT	"	60.00 E-12	60.82	62.18

라. 주파수에 따른 써지임피던스 변동범위

침입써지의 주파수를 60Hz, 500kHz 및 1,000kHz로 변화시켜 이에 따른 써지 임피던스의 변동범위를 계산 하였다. 계산결과 써지임피던스의 변동범위는 62~71[Ω]으로 써지해석시의 계산조건으로 가정한 70[Ω]은 적절한 값으로 확인되었다. <표 부8.3>에 계산결과를 나타내었다. <표 부8.4>는 정격전류 4,000[A] 및 8,000[A]용 GIS에 대한 크기변화에 따른 인덕턴스와 정전용량의 변동범위를 종합하여 정리한 표이다. 이 때 주파수는 500[kHz]를 기준으로 하였다.

표 부8.3 써지임피던스의 변동범위

케 이 스 명	진행파의 속도 10E8 [m/sec]	Surge Impedance [ohm]	주파수
GIS1.DAT	2.9994	77.50	60 [Hz]
	2.9968	77.52	500 [kHz]
	2.9971	77.51	1,000 [kHz]
GIS2.DAT	2.8010	74.49	60 [Hz]
	2.9979	69.61	500 [kHz]
	"	"	1,000 [kHz]
GIS3.DAT	2.9586	69.00	60 [Hz]
	2.9968	68.11	500 [kHz]
	2.9971	"	1,000 [kHz]
GIS4.DAT	2.7015	71.66	60 [Hz]
	2.7357	70.77	500 [kHz]
	2.7360	70.76	1,000 [kHz]
GIS5.DAT	2.5574	68.00	60 [Hz]
	2.7367	63.54	500 [kHz]
	"	"	1,000 [kHz]
GIS6.DAT	2.7000	62.99	60 [Hz]
	2.7357	62.18	500 [kHz]
	2.7360	"	1,000 [kHz]
범 위	2.70 ~ 2.74	62 ~ 71	60Hz ~ 1,000kHz

표 부8.4 도체의 크기와 선로정수

케이스명	GIS모선의 크기	L [μ H/m]	C [pF/m]
GIS1.DAT	b1 = 0.425[m]		
	a2 = 0.120[m]	EMTP : 0.265	EMTP : 43.04
	$\epsilon_s = 1.0$	수계산 : 0.303	수계산 : 43.90
GIS2.DAT	b1 = 0.445[m]		
	a2 = 0.140[m]	EMTP : 0.251	EMTP : 47.92
	$\epsilon_s = 1.0$	수계산 : 0.281	수계산 : 48.00
GIS3.DAT	b1 = 0.455[m]		
	a2 = 0.150[m]	EMTP : 0.233	EMTP : 48.99
	$\epsilon_s = 1.0$	수계산 : 0.272	수계산 : 50.00
GIS4.DAT	b1 = 0.425[m]		
	a2 = 0.120[m]	EMTP : 0.265	EMTP : 51.65
	$\epsilon_s = 1.2$	수계산 : 0.303	수계산 : 52.68
GIS5.DAT	b1 = 0.445[m]		
	a2 = 0.140[m]	EMTP : 0.251	EMTP : 57.50
	$\epsilon_s = 1.2$	수계산 : 0.281	수계산 : 57.60
GIS6.DAT	b1 = 0.455[m]		
	a2 = 0.150[m]	EMTP : 0.233	EMTP : 58.78
	$\epsilon_s = 1.2$	수계산 : 0.271	수계산 : 60.00
비 고 (변동범위)	도체크기 : 0.12 ~ 0.15[m] 외함크기 : 0.425 ~ 0.445[m]	수계산 : 0.271 ~ 0.303 EMTP : : 0.233 ~ 0.265	수계산 : 43.90 ~ 60.00 EMTP : 43.04 ~ 58.78

부록 9. 가공지선 창출길이 참고자료

전산 프로그램에 의한 차폐각 검토결과와 비교하기 위해 Hileman식에 의한 철탑높이별 완전차폐각을 구하여 보면 다음의 <표 부9.1>과 같으며, 평균철탑높이를 85m로 보면 전력선의 완전 너차폐에 필요한 하단 전력선 암에 대한 가공지선 암의 창출길이는 1.6m가 필요하게 된다. <표 부9.2> 및 <표 부9.3>에 일본의 1,000kV, 500kV선로와 한전의 345kV선로에 대한 차폐각 현황과 완전차폐를 위한 차폐각(창출길이) 계산치를 정리하였다.^[31]

표 부9.1 765kV 송전선의 철탑높이별 완전차폐각

계산조건 \ 탑 고	탑 고	80m	85m	90m	95m	100m
	하단암	42m	47m	52m	57m	62m
써지임피던스 Z_c	[Ω]	382	좌동	좌동	좌동	좌동
섬락전압 CFO	[kV]	2874	좌동	좌동	좌동	좌동
최소너격전류 I_c	[kA]	15.04	좌동	좌동	좌동	좌동
대지흡인거리 r_g	[m]	64.28	좌동	좌동	좌동	좌동
도체흡인거리 r_c	[m]	74.69	75.70	76.72	77.77	78.84
높이효과 γ		1.162	1.178	1.194	1.210	1.227
철탑높이 h	[m]	80.00	85.00	90.00	95.00	100.00
도체높이 y	[m]	66.30	71.30	76.30	81.30	86.30
창출길이 I a	[m]	-1.64	-2.6	-3.59	-4.64	-5.78
창출길이 II a	[m]	-0.64	-1.6	-2.59	-2.64	-4.78
차폐각도(상단) α	[$^\circ$]	-6.83	-10.75	-14.70	-18.71	-22.87
차폐각도(중단) α	[$^\circ$]	-2.30	-4.16	- 5.95	- 8.00	- 9.40
차폐각도(하단) α	[$^\circ$]	-1.00	-2.16	- 3.36	- 4.70	- 6.10

주) 창출길이는 I 은 상단암에 대한 창출길이, 창출길이 II는 최장암에 대한 창출길이임

표 부9.2 완전차폐를 위한 창출길이 및 차폐각 비교

전 압 [kV]	완전차폐 계산치		실제 적용치		철탑사양	비 고
	창출길이 [m]	차폐각도 [°]	창출길이 [m]	차폐각도 [°]		
345	+ 0.06	+ 0.5	0.0	0	내장56.1m	KEPCO
765	- 1.6	-10.8	- 1.0	-8.3	현수85.0m	
	- 1.7	-12.8	- 1.0	-9.5	내장85.0m	
500	- 1.6	-13.8	- 2.3	-17.5	내장 87.5m	일부본 중부전력
1,000	- 2.74	-16.7	- 2.5	-15.6	내장107.5m	일부본 동경전력

주) 1. 대지경사각 0°, 수직선 기준이며 차폐각은 상단암 대비임

2. 창출길이는 하단 전력선암에 대한 창출길이임

표 부9.3 가공지선의 창출길이(차폐각) 조사표

구분	전 압	선 로 명 (차폐각 계산용 철탑사양)	창출길이 (mm)		차 폐 각 [°]
			현 수	내 장	
한전	765kV	고창 실증시험선로 (내장형 76.0m)	1,020	480	- 7.13
		생산기술개발과제 (내장형 76.0m)	800	500	- 5.7
		검토에 사용된 철탑 (내장형 85m)	1,000	1,000	- 9.5
일본	1,000kV	동경전력 群馬山梨幹線 (내장형 97.5m)	2,500	2,500	- 15.6
		동경전력 北枋木幹線 (내장형 97.5m)	2,500	2,500	- 15.6
	500kV	동경전력 新所澤線 (내장형 132m)	2,000	2,500	- 18.3
		서국전력 西國中央西幹線 (현수형 85.3m)	3,200	3,200	- 16.1
		중부전력 第2基幹系統 (내장형 87.5m)	2,300	2,300	- 17.5
		북륙전력 加賀福光線 (현수형 73.0m)	2,500	2,500	- 26.6
		구주전력 玄海幹線 (내장형 85.0m)	1,000	1,200	- 13.5
		동북전력 相馬雙葉幹線 (내장형 85.0m)	2,500	2,500	- 18.3

주) 창출길이는 최장암(하단 전력선암)에 대한 창출길이임