



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

고장 위치법에 기반한
순간전압상승 평가 연구



2019 년 2 월

부경대학교 산업대학원

전 기 공 학 과

박 진 형

공학석사 학위논문

고장 위치법에 기반한
순간전압상승 평가 연구

지도교수 박 창 현

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2019 년 2 월

부경대학교 산업대학원

전 기 공 학 과

박 진 형

이 논문을 박진형의 공학석사
학위논문으로 인준함



주 심 공학박사 장 윤 석 ⑧

위 원 공학박사 우 경 일 ⑧

위 원 공학박사 박 창 현 ⑧

목 차

목차	i
그림 목차	iii
표 목차	iv
Abstract	v
제1장 서 론	1
제2장 본 론	3
2.1 순간전압상승(Voltage swell) 현상	3
2.2 계통 사고로 인한 순간전압상승	6
2.2.1 전력계통에서의 고장 통계	6
2.2.2 1선지락사고 고장계산 방법	10
2.2.3 중성점 접지 방식과 건전상의 전압상승	14
2.3 고장 위치법(The method of fault positions)과 순간전압 상승 평가	17
2.3.1 순간전압상승 평가를 위한 고장 위치법	17
2.3.2 고장 위치법의 적용	19
2.3.3 고장 위치법을 이용한 취약지역 결정	21
제3장 사례 연구	23
3.1 모의 계통	23
3.2 사고전압 계산과 취약지역의 결정	25
3.3 고장 위치법의 적용과 순간전압상승 횟수 추산	37

제4장 결론	46
참고문헌	47



그림 목차

- 그림 1. 전압 품질 문제 발생 통계 (EPRI 보고서)
- 그림 2. 전압품질 문제들의 전압크기와 지속시간
- 그림 3. 전력 설비별 고장 발생 비교
- 그림 4. 송·변전 설비에서의 고장 원인별 비교
- 그림 5. 1선 지락 사고 모델링
- 그림 6. A상 1선 지락 사고에 대한 대칭성분 회로
- 그림 7. 비접지 방식
- 그림 8. 직접 접지 방식
- 그림 9. 소호 리액터 접지 방식
- 그림 10. 저항 접지 방식
- 그림 11. 순간전압상승 평가를 위한 고장 위치법 절차
- 그림 12. 고장위치법 적용을 위한 4등분 선로 모델
- 그림 13. 고장위치법 적용을 위한 10등분 선로 모델
- 그림 14. 민감 부하에 대한 순간전압상승 취약지역의 예
- 그림 15. IEEE-30 모선 계통도
- 그림 16. 1선 지락 사고시 15번 모선의 B상 취약지역
- 그림 17. 1선 지락 사고시 15번 모선의 C상 취약지역
- 그림 18. 1선 지락 사고시 20번 모선의 B상 취약지역
- 그림 19. 1선 지락 사고시 20번 모선의 C상 취약지역
- 그림 20. 1선 지락 사고시 25번 모선의 B상 취약지역
- 그림 21. 1선 지락 사고시 25번 모선의 C상 취약지역

표 목차

- 표 1. 전압품질 관련 국제 표준
- 표 2. 한전계통에서의 전력설비 고장 통계
- 표 3. 송·변전 설비 고장 원인별 통계
- 표 4. 발전설비에서의 고장 원인
- 표 5. 송·변전설비 전압별 고장 통계
- 표 6. 송전설비에서의 월별 고장 발생 통계
- 표 7. 변전설비에서의 월별 고장 발생 통계
- 표 8. 접지방식별 특성
- 표 9. 고장 위치에서의 1선지락으로 인한 건전상 전압 (Case1)
- 표 10. 고장 위치에서의 1선지락으로 인한 건전상 전압 (Case2)
- 표 11. 선로의 사고율 데이터
- 표 12. IEEE-30 모선 계통 데이터
- 표 13. 1선지락사고로 인한 B상 및 C상의 사고 전압 (15번 모선)
- 표 14. 1선지락사고로 인한 B상 및 C상의 사고 전압 (20번 모선)
- 표 15. 1선지락사고로 인한 B상 및 C상의 사고 전압 (25번 모선)
- 표 16. B상의 취약지역과 순간전압상승 횟수 (15번 모선)
- 표 17. C상의 취약지역과 순간전압상승 횟수 (15번 모선)
- 표 18. B상의 취약지역과 순간전압상승 횟수 (20번 모선)
- 표 19. C상의 취약지역과 순간전압상승 횟수 (20번 모선)
- 표 20. B상의 취약지역과 순간전압상승 횟수 (25번 모선)
- 표 21. C상의 취약지역과 순간전압상승 횟수 (25번 모선)
- 표 22. 민감 부하단에서의 1상당 연평균 순간전압상승 횟수 추산 결과

A study on voltage swell assessment based on the fault positions method

Park, Jin Hyeong

Department of Electrical Engineering, Graduate School of Industry,

Pukyong National University

Supervised by Prof. Park, Chang-Hyun, Ph.D.

ABSTRACT

This paper covers the stochastic assessment of voltage swells based on the fault positions method. The voltage swell is one of the problems of power quality and although not as often as voltage sag does, it has been perceived as a problem affecting the operation of sensitive loads and causing various damages. The definition of voltage swell is the phenomenon as RMS voltage increase of 1.1-1.8 p.u. for 0.5 cycle to 1 minute. One major cause of voltage swell is a single line-to-ground fault which is the most common fault type in power systems. When a single line-to-ground fault occurs, the faulted phase can experience voltage drop and voltage swells occur on unfaulted phases. Generally, the voltage increase of a swell is more severe in ungrounded or delta systems. Effective countermeasures for voltage swells need to assess the trend of voltage swell occurrences at sensitive loads. Although various methods of assessing voltage sags have been introduced, there is little study on assessing voltage swells caused by faults in power

system. In this paper, the assessment of voltage swells due to single line-to-ground faults was performed using the method of fault positions.



제1장 서론

정보화와 산업화로 인해 반도체 소자 기반의 자동화기기, 첨단 디지털 장비 및 의료기기 등의 사용이 많이 늘어나고 있으며 이러한 기기들은 입력 전원에 상당히 민감한 특성을 가진다. 따라서 계통의 사고나 기타 외란에 의한 입력 전압의 변동으로 인해 많은 기기 및 설비의 오작동이 발생하고 있으며 이로 인한 심각한 경제적 손실도 증가하고 있다 [1-3]. 과거에는 정전 없는 지속적인 전력공급이 전력계통 운용상의 제일 중요한 목표였으나 근래는 공급 신뢰도뿐 아니라 전력품질에 관한 관심이 크게 증가하였다. 전력품질에 대한 관심 증대의 이유는 과거보다 현대의 부하들이 입력 전원에 대한 민감도가 크게 증가하였고, 전력품질 저하를 야기하는 부하들 또한 증가하였기 때문이다. 또한 전기의 품질에 대한 소비자의 인식변화와 공급자 중심에서 소비자 중심으로의 전력 산업이 변화한 것도 주된 원인이라 하겠다. 전력계통에서는 다양한 전력품질 문제들이 발생하고 있으며 대표적인 단기 전압 변동 문제로 순간전압강하와 순간전압상승이 있다. 순간전압강하는 1분 이내로 전압이 감소했다가 회복되는 현상이며 순간전압상승은 1분 이내로 전압이 상승했다가 정상 범위로 회복되는 현상이다 [1]. 두 현상 모두 민감기기의 정상적인 동작을 방해하여 산업현장에서 큰 피해를 입히는 전력품질 문제이다. 순간전압강하의 발생빈도가 순간전압상승에 비해 현저히 높고 민감 부하의 트립을 주로 야기하여 반도체 기반의 자동화 공정을 기반으로 하는 산업현장에서는 순간전압상승 보다 더 심각한 문제로 인식되고 있다. 그러나 순간전압상승도 누적되어 발생할 경우 민감 기기의 전원부에 고장을 초래할 수 있고 기기의 오동작도 야기할 수 있다. 이러한 개별 기기의 오동작은 전체 공정 중단을 초래할 수도 있다. 따라서 순간전압강하와 관련된 많은 연구가

수행되고 있으며 순간전압상승 문제에 대한 체계적인 관리 및 대책 수립 등을 위한 다양한 연구도 필수적으로 수행되어야 한다.

본 논문은 계통에서의 사고로 인해 발생할 수 있는 순간전압상승에 대한 장기적인 발생 경향을 평가할 수 있는 기술을 다룬다. 계통내 특정 지점에서 사고로 인한 순간전압상승이 얼마나 발생할지를 추산하는 기술로 본 논문에서는 순간전압강하 평가 기술 중 하나이며 효과적인 전압상승 관리 및 대책 수립이 가능한 고장 위치법(the method of fault positions)을 수정하여 순간전압상승 평가를 수행하였다. 제안하는 방법을 이용하여 IEEE-30 모선 계통내 임의의 민감부하단에 대한 사례 연구를 수행하였다.



제2장 본 론

2.1 순간전압상승(Voltage swell) 현상

전압과 관련된 문제들은 대표적으로 순간전압상승(voltage swell), 순간전압강하(voltage sag) 및 순간정전(interruption)등 나누어진다. 전압 변동의 크기나 영향은 순간정전이 가장 크지만, 발생빈도가 다른 현상들에 비해 현저히 낮다. 미국전력연구소(EPRI)의 통계 자료에 따르면 전압품질문제 중 순간전압강하가 60% 정도로 가장 빈번히 발생하고 그 뒤로 순간전압상승이 29%, 순간정전은 약 3% 정도의 비율로 발생하는 것으로 나타났다. (그림1)

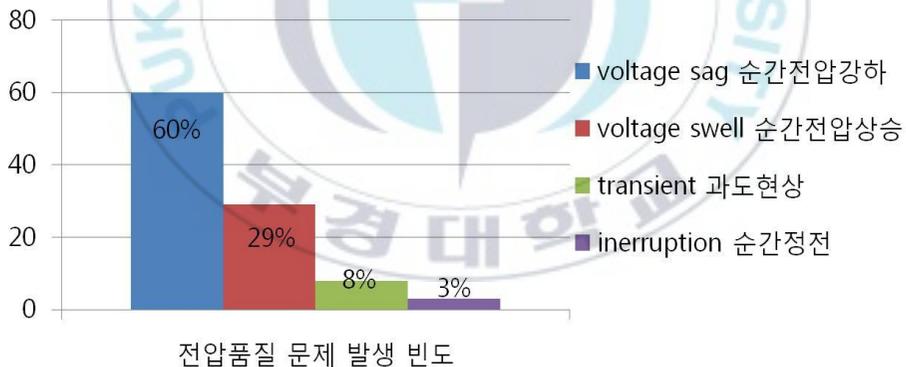


그림 1. 전압 품질 문제 발생 통계 (EPRI 보고서)

순간전압상승은 상승 전압의 크기와 지속시간으로 특징지어진다. IEEE-1159에 의하면 순간전압상승은 0.5cycle에서 1분 사이의 지속시간을 가지며 전력 주파수에 대한 RMS전압이 1.1에서 1.8[p.u.] 사이의 값을 가지는 현상으로 정의된다. 해당 지속시간은 순시(instantaneous: 0.5-30cy

cles), 순간(momentary:30cycle-3s), 일시(temporary:3s-1min)의 세 가지 범주로 세분하기도 한다 [1, 2]. 그림 2는 순간전압상승을 포함한 대표적인 전압품질 문제들에 대한 전압 크기 및 지속시간의 기준을 나타낸다. 순간전압상승의 대표적인 원인은 계통에서의 1선 지락 사고(SLGF: single line-to-ground fault)이며 커패시터 뱅크의 통전, 갑작스러운 부하의 탈락 및 기타 스위칭에 의해서도 발생한다. 여러 기관에서 국제기구에서 전압품질 등에 대한 국제 규격을 정의하고 대표적인 사안을 표 1에 정리하였다.

본 논문에서는 계통에서의 1선 지락 사고로 인해 예상되는 순간전압상승 횟수를 추산하는 방법을 제안한다. 1선 지락 사고로 인한 순간전압상승은 계통의 접지계통에 따라 영향을 받으며 특히 고 저항 및 비 접지 계통인 경우 전압상승이 크게 발생한다. 일반적으로 지락이 발생하는 상의 전압은 떨어지게 되고 지락이 발생하지 않은 건상상의 전위가 상승하여 순간전압상승이 발생한다.



그림 2. 전압품질 문제들의 전압크기와 지속시간

표 1. 전압품질 관련 국제 표준

Standard	
IEEE 446	IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications
IEEE 493	Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems
IEEE 1100	IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment
IEEE 1159	IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality
IEEE 1250	IEEE Guide for Service to Equipment Sensitive to Momentary Voltage Disturbances
IEEE 1346	IEEE Recommended Practice For Evaluating Electric Power System Compatibility With Electronic Process Equipment
IEC 61000-2-2	Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems
IEC 61000-2-4	Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances
IEC 61000-4-11	Voltage Dips, short Interruptions and voltage variations immunity tests
EN 50160	Voltage Characteristics in Public Distribution Systems

2.2 계통 사고로 인한 순간전압상승

전력계통에서는 다양한 원인에 의해 사고가 발생하고 있으며 그 형태도 다양하다. 대표적인 사고의 형태는 1선지락사고, 2선지락사고, 선간단락사고 및 3상 사고 등이다. 일반적으로 4가지 형태 모두에서 사고가 발생한 상에는 전압강하나 순간정전이 발생하게 된다. 특히 1선지락사고의 경우 계통의 접지 방식에 따라 사고가 발생하지 않은 건전상에서 전압상승도 발생할 수 있다. 즉, 순간전압강하 및 상승 모두 계통에서의 사고가 대표적인 원인 중 하나이며 계통에서 발생하는 사고 빈도에 따라 전압상승 및 강하의 발생 빈도와 경향이 결정된다.

2.2.1 전력계통에서의 고장 통계

계통에서 발생하는 고장 현황을 알아보기 위해 전력거래소에서 제공하는 “2017 전력계통 운영실적” 자료를 분석하였다 [4]. 표 2는 2016년과 2017년에 발생한 설비별 고장 발생 통계이며 그림 3은 통계 그래프이다. 발전설비 고장은 전년 대비 9건 감소한 151건 발생하였고, 송전설비에서는 전년 대비 25건 감소한 77건 발생하였다. 변전설비는 15건 감소한 48건이 발생하였다.

표 2. 한전계통에서의 전력설비 고장 통계

[단위 : 건]

구분	2016년	2017년	비율
발전설비	160	151	51.75%
송전설비	102	77	29.78%
변전설비	63	48	18.47%
합 계	325	276	

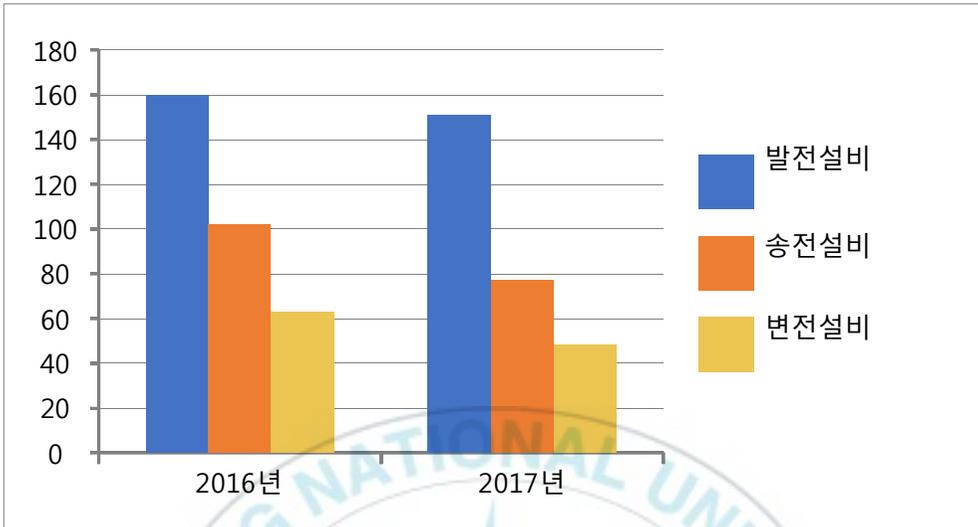


그림 3. 전력 설비별 고장 발생 비교

표3은 송·변전 설비에서의 고장 원인별 통계자료이고 그림 4는 비교 그래프이다. 설비결함이 47건(37.6%)로 가장 많이 발생하였고 자연재해가 40건(32.0%)로 발생하였다. 외부적인 요인을 제외한 보수불량, 인적실수 등은 전년대비 각각 24건(14.0%)에서 8건(6.0%), 13건(7.0%)에서 1건(0.0%)로 감소하였다.

표 3. 송·변전 설비 고장 원인별 통계

[단위 : 건]

구분		자연 재해	설비 결함	보수 불량	외물 접촉	고장 파급	인적 실수	원인 불명	소계
송변전	2016년	44	36	24	23	22	13	3	165
	2017년	40	47	8	23	6	1	0	123

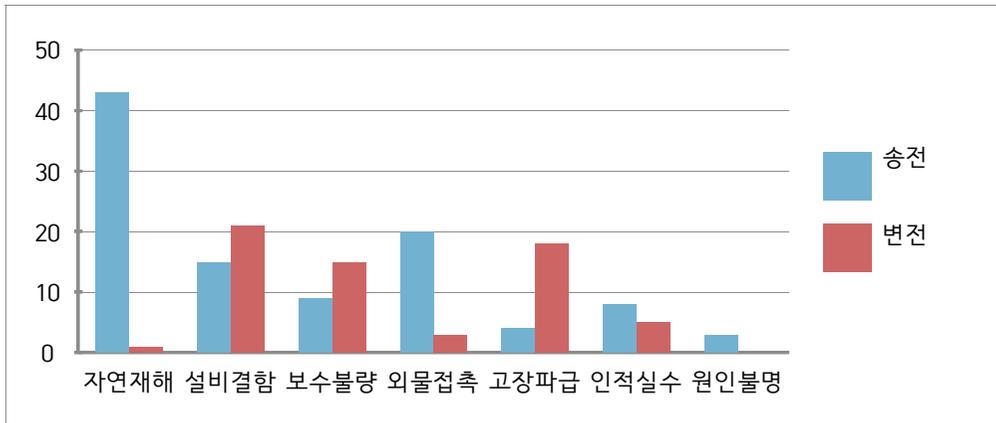


그림 4. 송·변전 설비에서의 고장 원인별 비교

발전설비에서의 고장 원인 통계는 표 4에 정리하였다. 설비 오동작이 61건(40.4%)로 가장 큰 원인이며, 경년변화 18건(11.9%)순으로 고장 원인이 나타났다.

표 4. 발전설비에서의 고장 원인

[단위 : 건]

구분	발전 설비	
	2016년도	2017년도
설계제작결함	19	12
시공결함	10	9
정비미흡	11	7
오동작	58	61
경년변화	10	18
진동	1	2
인적과실	11	11
자연재해	2	3
고장파급	11	1
연소결함	11	5
이물유입	3	1
기타	13	21
합계	160	151

표 5는 송·변전설비 전압별 고장을 최근 6년간 자료를 분석하여 나타내었다. 전체 고장 1,015건 중 송전선로 154kV 계통에서의 고장이 535건(52.71%)으로 가장 빈번하게 발생하였다. 표 6과 7은 송·변전설비 월별 고장 건수 자료이다.

표 5. 송·변전설비 전압별 고장 통계

[단위 : 건]

구분	송전선로				변전설비							합계
					변압기			모선			HVDC	
	765kV	345kV	154kV	HVDC	765kV	345kV	154kV	765kV	345kV	154kV		
2012년	0	36	161	0	3	11	37	1	4	10	0	263
2013년	0	19	70	5	0	5	6	0	9	45	2	161
2014년	0	13	83	0	0	5	11	1	9	30	7	159
2015년	1	17	88	0	1	3	3	2	6	19	2	142
2016년	2	23	73	4	1	7	3	1	18	28	5	165
2017년	0	14	60	3	0	5	4	1	17	21	0	125
계	3	122	535	12	5	36	64	6	63	153	16	1,015
비율(%)	0.29	12.01	52.71	1.18	0.49	3.54	6.31	0.59	6.21	15.07	1.58	100.0

표 6. 송전설비에서의 월별 고장 발생 통계

[단위 : 건]

구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	합계
2013년	3	1	6	15	7	7	4	19	11	6	8	7	94
2014년	1	16	7	3	3	7	15	8	4	2	3	27	96
2015년	4	5	6	3	2	2	14	12	9	6	13	30	106
2016년	16	4	8	6	14	6	15	2	11	14	2	4	102
2017년	0	3	4	4	8	9	26	6	2	5	6	4	77

표 7. 변전설비에서의 월별 고장 발생 통계

[단위 : 건]

구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	합계
2013년	4	4	8	1	5	9	12	4	6	3	7	4	67
2014년	5	1	4	3	5	5	10	4	7	6	2	11	63
2015년	2	5	2	3	4	2	3	1	2	6	4	2	36
2016년	7	7	2	6	2	5	7	5	7	4	5	6	63
2017년	2	2	3	3	1	4	9	6	5	7	3	3	48

2.2.2 1선지락사고 고장계산 방법 [5]

전력계통에서의 사고로 인한 사고전류 및 전압 등을 파악하기 위해서는 고장계산을 수행해야 한다. 일반적으로 계통에서의 고장계산은 차단기의 용량 결정이나 보호 계전기의 정정치 설정, 통신선의 유도장해 등의 분석을 위해 실시한다. 그뿐만 아니라 계통 사고시의 전압강하 및 전압상승의 사고전압 변화를 파악하기 위해서도 반드시 필요하다. 3상 사고와 같은 대칭 사고의 경우 사고지점에서의 테브닌 등가 임피던스를 구해 쉽게 사고 전류를 산출할 수 있다. 그러나 1선 지락사고와 같은 불평형 사고의 경우 사고시 계통의 전압과 전류가 불평형 상태가 되므로 평형 조건에서 단상 회로처럼 해석이 불가능하다. 일반적으로 대칭 성분법이라는 해석 이론을 바탕으로 불평형 사고 해석이 이루어지며 평형 사고의 해석보다는 다소 복잡하다. 고장 위치법에 기반한 순간전압상승 평가를 실시하기 위해서는 계통의 다양한 위치에서의 1선지락사고 해석이 필요하다. 계통 임

의의 위치에서 1선지락사고 모의가 가능해야 하며 사고시 건정상 전압을 계산해야 한다. 그림 5와 같이 임의의 K 위치에서 A상에 1선지락사고가 발생한 경우 사고지점으로 흐르는 고장 전류와 사고시 각 상의 사고전압을 계산하는 방법은 다음과 같다. 가장 가혹한 사고 상황을 산정하기 위해 고장 임피던스는 무시한다.

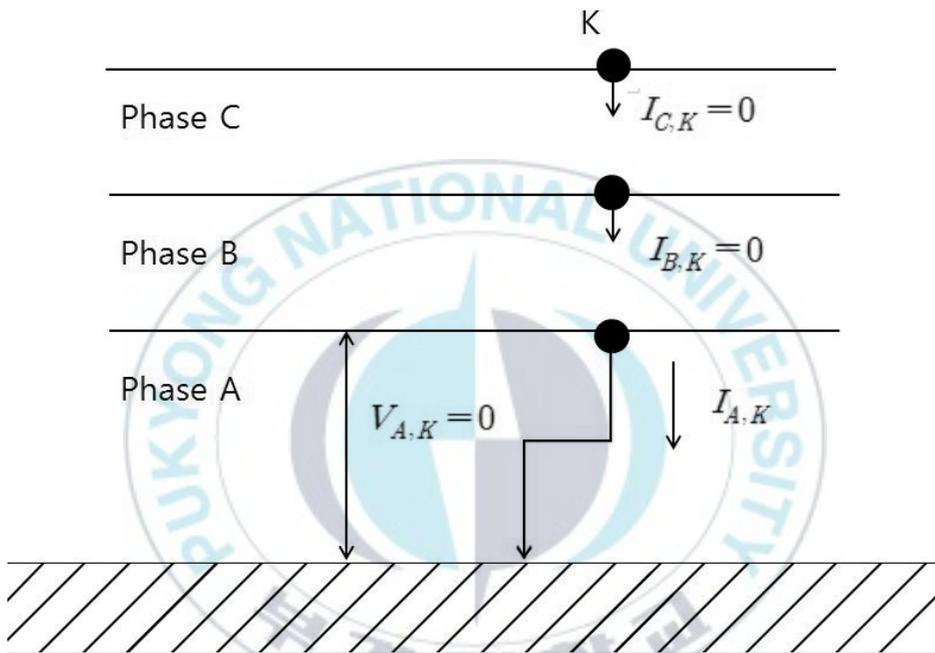


그림 5. 1선 지락 사고 모델링

그림 5와 같은 1선 지락 사고 조건으로부터 다음과 같은 전압, 전류 관계를 알 수 있다.

$$I_{B,K} = I_{C,K} = 0 \dots\dots\dots (2-1)$$

$$V_{A,K} = 0 \dots\dots\dots (2-2)$$

상기 사고 조건 관계식들에 대해 대칭 성분 변환을 하면 다음과 같은 시퀀스 전압과 전류의 관계식을 얻을 수 있다.

$$I_K^0 = I_K^1 = I_K^2 \quad \dots\dots\dots (2-3)$$

$$V_K^0 + V_K^1 + V_K^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (2-4)$$

따라서 상기의 시퀀스 관계식을 만족하는 대칭성분 회로는 그림 6과 같이 나타낼 수 있다.

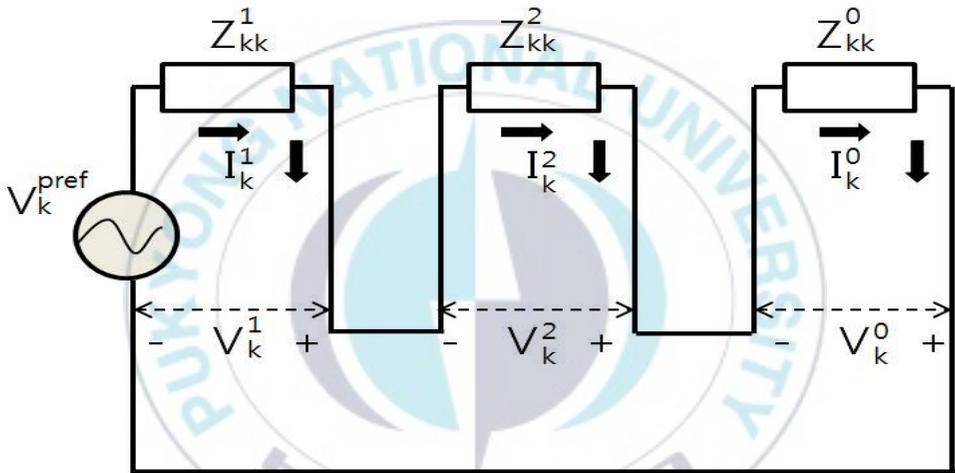


그림 6. A상 1선 지락 사고에 대한 대칭성분 회로

대칭성분 회로에 흐르는 전류는 다음과 같이 계산된다.

$$I_K^0 = I_K^1 = I_K^2 = \frac{V_K^{pref}}{Z_{KK}^0 + Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} \quad \dots\dots\dots (2-5)$$

또 사고위치 K에서의 1선 지락에 의한 임의의 모선 m의 대칭성분 전압은 다음과 같다.

$$V_0 = -Z_{mK}^0 I_K^0 \quad \dots\dots\dots (2-6)$$

$$V_m^1 = V_{A,m}^{pref} - Z_{mK}^1 I^1 \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

$$V_m^2 = -Z_{mK}^2 I_K^2 \quad \dots\dots\dots (2-8)$$

대칭성분 회로의 전류 및 전압을 페이저 도메인으로 다시 변환하면 최종적으로 K위치에서의 1선 지락 사고시 임의의 모선 m에서의 사고 전압을 구할 수 있다. (식 (2-9)~(2-11)) $V_{A,m}^{pref}$ 은 모선 m에서의 A상 사고전 전압이고 상수 a는 $a = 1\angle 120^\circ$ 이다. A상의 지락을 가정하였으므로 일반적으로 A상에는 전압강하가 발생하게 되고 건전상인 B상과 C상에서는 전압상승이 발생하게 된다. 전압상승의 정도는 계통의 접지 형태 및 임피던스 등에 따라 달라진다.

$$V_{A,m}^{fault} = V_{A,m}^{pref} - \frac{Z_{nK}^0 + Z_{mK}^1 + Z_{mK}^2}{Z_{KK}^0 + Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} V_K^{pref} \quad \dots\dots\dots (2-9)$$

$$V_{B,m}^{fault} = a^2 V_{A,m}^{pref} - \frac{Z_{mK}^0 + a^2 Z_{mK}^1 + a Z_{mK}^2}{Z_{KK}^0 + Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} V_K^{pref} \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

$$V_{C,m}^{fault} = a V_{A,m}^{pref} - \frac{Z_{mK}^0 + a Z_{mK}^1 + a^2 Z_{mK}^2}{Z_{KK}^0 + Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} V_K^{pref} \quad \dots\dots\dots (2-11)$$

2.2.3 중성점 접지 방식과 건전상의 전압상승

계통에는 다양한 중성점 접지 방식이 존재하며 접지 형태 및 임피던스 등에 따라 계통 사고시 미치는 영향이 다르다 [6, 7]. 중성점 접지는 지락 사고시 건전상의 대지 전위 상승을 억제하고, 전선로 및 기기의 절연 레벨 경감 및 보호 계전기의 확실한 동작 등을 위해 실시한다. 대표적인 접지방식으로 중성점 직접 접지, 저항 접지, 소호 리액터 접지 및 비접지 방식 등이 있다. 접지방식별 사고시 나타나는 사고전류 및 전압의 양상이 달라진다. 그림 7과 같은 비접지 방식은 비교적 선로 길이가 짧거나 전압이 낮은 계통에 채용한다. 특징으로 1선지락시 건전상의 전압상승이 비교적 크게 나타나며 고장 전류는 작다. 따라서 비접지 계통에서는 순간전압상승이 다른 접지방식보다 더 잘 발생하게 된다. 반면 그림8과 같은 직접 접지방식은 중성점을 도체로 직접 접지하는 것으로 1선지락시 큰 지락전류가 발생한다. 그러나 건전상의 전위상승은 거의 없어 절연 관리가 중요한 고전압 계통에서 주로 채택하고 있다. 또한, 큰 지락전류로 인해 사고 검출이 쉬운 장점도 있다 [6, 7].

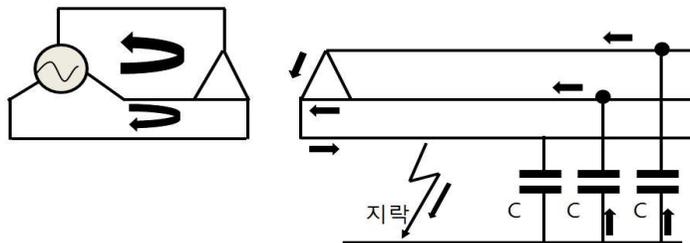


그림 7. 비접지 방식

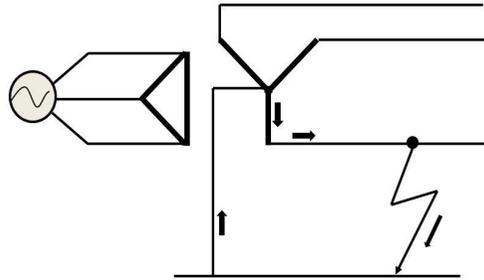


그림 8. 직접 접지 방식

그림 9와 같은 소호 리액터 접지방식은 접지간 리액터를 연결하는 방식으로 대지 정전 용량과 공진하는 리액터를 통해 접지하여 지락시 고장 전류를 최소화하게 된다. 그러나 이 방식도 1선지락시 건전상의 전위상승이 크게 나타나는 특성이 있다.

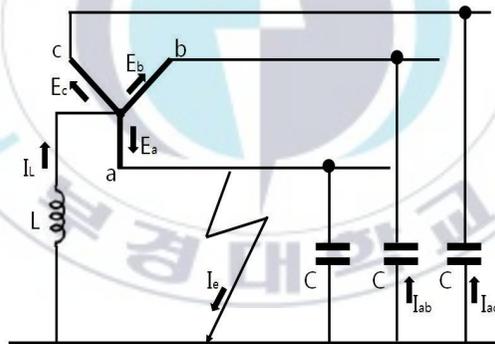


그림 9. 소호 리액터 접지 방식

그림 10과 같이 중성점 접지시 저항을 삽입하여 접지를 시행할 수 있으며 이러한 방식을 저항 접지라 한다. 접지 저항값이 크면 비접지 계통의 특성이 나타나고 저항값이 작으면 직접 접지의 특성이 나타난다. 따라서 고저항 접지를 할 경우 1선지락시 건전상에 순간전압상승이 발생할 수 있다. 각 접지 방식별 특성을 표 8에 정리하였다.

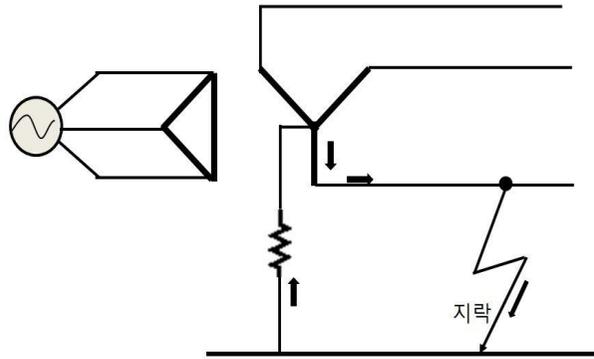


그림 10. 저항 접지 방식

표 8. 접지방식별 특성

접지방식	계전기 동작	지락전류	전위 상승	특징
직접 접지	가장 확실	최대	최소	단절연가능
저항 접지	확실	중간	약간 큼	-
비 접지	불확실	작음	큼	저전압 적용
소호 리액터 접지	불확실	최소	큼($\sqrt{3}$ 배↑)	고장전류 최소

2.3 고장 위치법(The method of fault positions)과 순간전압 상승 평가

2.3.1 순간전압상승 평가를 위한 고장 위치법

고장 위치법은 본래 순간전압강하 평가를 위하여 제안된 방법이나 본 연구에서는 순간전압상승 평가에 수정 적용하였다. 대표적인 순간전압강하 평가 방법으로 임계거리법, 고장위치법 및 수치해석 방법을 이용한 취약지역 기법 등이 있다 [8-10]. 임계거리법은 방사상 계통에는 효과적이지만 망구조 계통에는 적용하기 어려운 단점이 있다. 수치해석 방법을 이용한 평가 방법은 알고리즘이 다소 복잡하여 구현이 쉽지 않다. 반면 고장 위치법은 방사상 계통과 망구조 계통 모두에 적용 가능하여 순간전압강하 평가 및 예측에 많은 사용 되어 왔다. 고장 위치법을 순간전압상승 평가에 적용하기 위해서는 1선지락 사고시 지락상이 아닌 건전상의 전압을 기준으로 한계 전압 이상의 상승에 적용할 수 있도록 수정되어야 한다. 제안하는 고장위치법의 절차는 그림 11과 같다. 먼저 평가대상 계통의 선로들을 적당한 간격으로 나눈다. 각 구간의 중간을 고장 위치로 선정한다. 각 구간의 모든 사고는 선정된 고장 위치에서의 사고 전압과 동일하다고 가정한다. 구간을 많이 세분할수록 고장 위치의 수가 많아지고 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 모든 고장 위치에서 1선지락 사고 모의를 해야 하므로 계통이 클수록 고장 위치의 수가 많아질수록 계산량이 늘어나는 점을 고려해야 한다. 다음으로 계통의 연평균 사고율과 선로의 길이로부터 각 구간별 연평균 사고 횟수를 계산한다. 선정된 각 고장 위치에서 1선지락사고를 모의하고 민감 부하모선 또는 관심 지점에

서의 사고전압을 기록한다. 전압상승은 사고가 발생하지 않은 건전상에서 발생하므로 A상 지락의 경우 B상 및 C상의 전압을 기록한다. 기록된 결과로부터 주어진 전압상승 한계 전압 이상의 전압상승을 야기한 고장 위치 및 구간을 찾는다. 최종적으로 한계 전압 이상의 전압상승을 야기한 모든 구간에서의 연평균 사고 횟수를 합산하여 관심 모선에서의 연평균 순간전압상승 횟수를 산출한다.

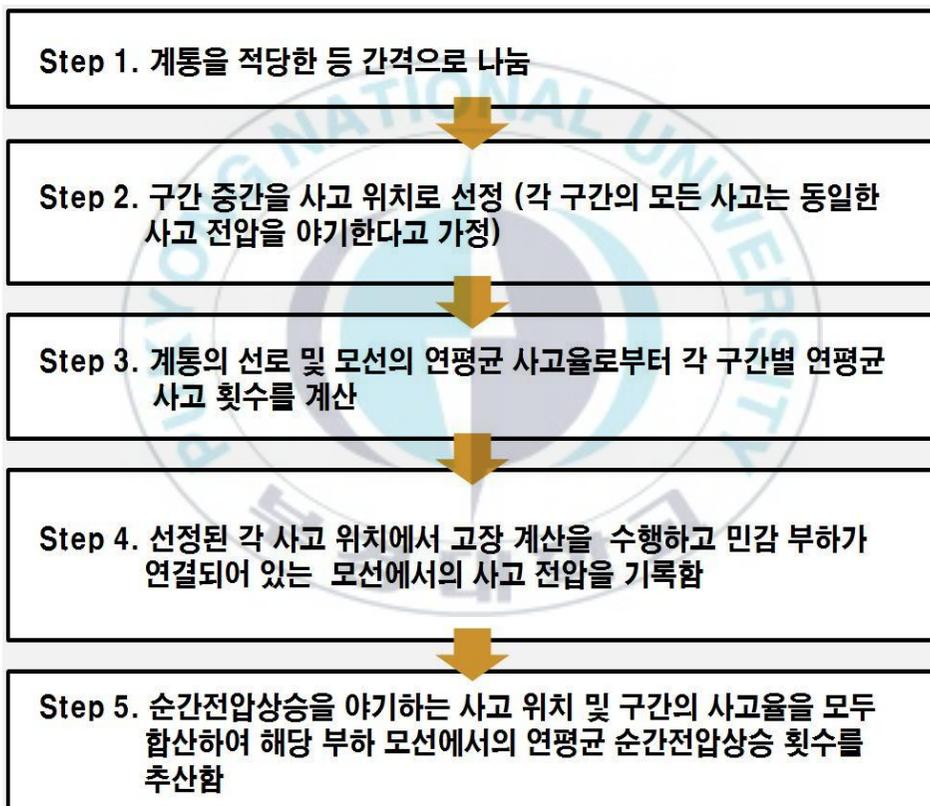


그림 11. 순간전압상승 평가를 위한 고장 위치법 절차

2.3.2 고장 위치법의 적용

임의의 선로에 대해 제안하는 고장위치법을 적용하여 순간전압상승 평가를 시행하였다. 본 예에서 선로의 길이는 36[km]이고 한계 전압은 1.1 [p.u.]가정하였다. 또한, 계통선로의 연평균사고율은 0.281[$\text{fault}/100\text{km-year}$]로 가정하였다. 그림 12는 임의의 선로를 4개의 등 구간으로 나누고 구간의 가운데 및 양 끝 모션을 고장 위치로 선정된 상태를 나타낸다. 총 6개의 고장 위치가 선정되었고 각 위치에서 1선지락사고를 모의한다. 1선지락에 따른 건전상의 전압을 기록한다. 표 9는 각 고장 위치에서의 사고로 인한 건전상의 전압을 나타낸다. 한계 전압이 1.1[p.u.]이므로 그 이상의 전압상승이 발생한 고장 위치는 0%, 12.5%, 37.5%, 62.5% 지점으로 나타났다. 고장 위치법에서는 각 위치에서의 사고전압을 각 구간의 사고전압으로 나타내므로 해당 선로에서 전압상승을 야기하는 전체 구간은 선로의 75%까지로 총 27[km] 해당된다.

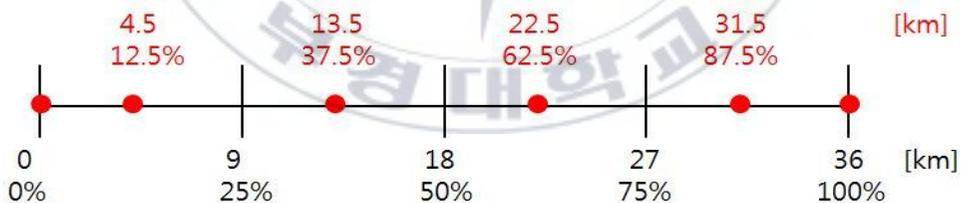


그림 12. 고장위치법 적용을 위한 4등분 선로 모델

표 9. 고장 위치에서의 1선지락으로 인한 건전상 전압 (Case1)

Fault position (%)					
0	12.5	37.5	62.5	87.5	100
1.21	1.18	1.17	1.12	1.07	1.07

따라서 해당 선로에서 발생 되는 1선 지락 사고로 인한 전압상승은 선로 사고율에 따라 연평균 0.076[swells/year]회 발생할 것으로 예상 할 수 있다.

다음은 그림 13과 같이 선로를 10등분 하여 고장 위치법을 적용해 보았다. 양쪽 모선을 포함 총 12개의 고장 위치가 선정된다. 각 고장 위치에서 1선지락사고를 모의하고 건전상의 전압을 표 10과 같이 기록하였다. 한계 전압 1.1[p.u.] 이상의 전압상승이 발생하는 구간은 선로의 70% 구간으로 길이는 25.2[km]이다. 4등분한 경우와 비교하면 1.8[km]의 차이가 발생했다. 해당 선로에서의 전압상승은 연평균 0.071[swells/year]회 발생할 것으로 산출되었다. 선로 구간을 더 세분하였기 때문에 한계 전압 이상의 전압상승을 야기하는 선로 구간을 더 정확하게 찾을 수 있었다.



그림 13. 고장위치법 적용을 위한 10등분 선로 모델

표 10. 고장 위치에서의 1선지락으로 인한 건전상 전압 (Case2)

Fault position (%)											
0	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	100
1.21	1.18	1.18	1.17	1.17	1.16	1.14	1.13	1.09	1.08	1.08	1.07

2.3.3 고장 위치법을 이용한 취약지역 결정

취약지역(AOV: Area of vulnerability)의 개념은 순간전압강하 평가에서 먼저 소개되었다. 취약지역이란 민감 부하단을 기준으로 특정 한계 전압 이하의 전압강하를 야기하는 사고영역으로 정의된다. 같은 의미로 순간전압상승에 대한 취약지역도 정의될 수 있다. 즉, 민감 부하단에 특정 한계 전압 이상의 전압상승을 야기하는 사고 위치들을 영역화할 수 있다. 순간전압강하에 대한 취약지역은 일반적으로 사고상에서 나타나고 순간전압상승에 대한 취약지역은 건전상에 나타난다. 정확한 취약지역을 계산할 수 있는 방법이 소개되어 있으나 고장 위치법의 사고 전압 계산 결과를 이용해서도 취약지역을 찾을 수 있다. 고장위치법을 이용하여 정확한 취약지역을 계산하기 위해서는 매우 많은 고장 위치 선정이 필요하여서 대규모 계통에서는 계산량이 너무 많아지는 단점이 있다. 그러나 취약지역을 계산하게 되면 민감 부하단에서의 순간전압상승 발생 정도를 직관적으로 파악할 수 있다. 또한 계통 내 사고에 대한 민감 부하의 취약 범위(정도)를 평가하는 방편이 된다. 취약지역 넓을수록 순간전압상승을 경험할 확률이 높아지게 된다. 그림 14는 순간전압상승에 대한 취약지역의 예이다. 민감 부하단에 순간전압상승을 일으키는 고장 위치들을 모두 찾고 영역화를 한 것으로 해당 영역에서 1선지락사고가 발생할 경우 민감 부하단은 전압상승을 경험하게 됨을 나타낸다. 불평형 사고 발생시 각상의 전압은 서로 다른 특성을 나타내며, 취약지역은 각 사고 형태 및 각 상에 대해 따로따로 모두 결정되어야 한다.

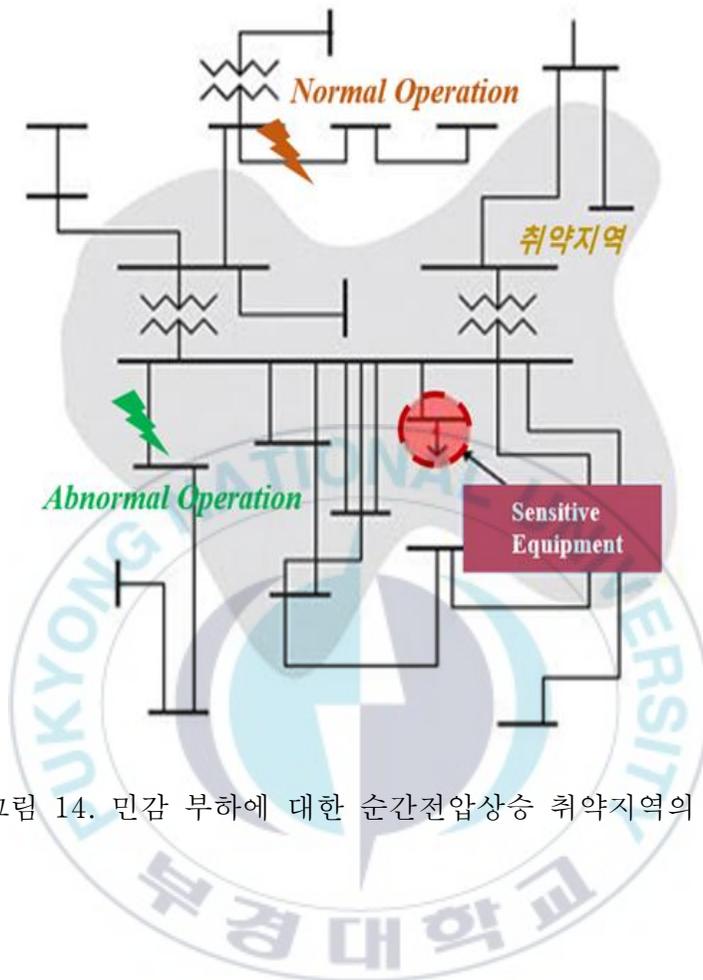


그림 14. 민감 부하에 대한 순간전압상승 취약지역의 예

제 3 장 사례 연구

3.1 모의 계통

제안하는 방법을 이용하여 IEEE-30 모선 계통에 대한 순간전압상승 평가를 실시하였다. 계통에서의 1선지락사고 해석을 위해 전력계통 해석 소프트웨어인 PowerWorld simulator를 이용하였다. PowerWorld simulator는 전력계통에서의 고장 계산뿐만 아니라 전력 조류계산, 최적 조류계산, 안정도 등의 실효치 기반의 다양한 계통 해석 기능을 가지고 있다. 그림 15는 IEEE-30 모선 계통의 단선도이다. 30개의 모선과 2개의 발전기 및 4개의 동기 조상기, 4개의 변압기, 37개의 선로와 21개의 부하로 구성되어 있다. 변압기는 모두 비접지를 가정하였다. 순간전압상승 평가 대상 민감 부하 모선으로 15번, 20번, 25번 모선을 선정하였으며 전압상승 한계 전압은 1.2[p.u.]로 가정하였다. 즉, 1.2[p.u.] 이상의 전압상승이 각 모선에서 연평균 어느 정도 빈도로 발생할지를 평가하였다. 제안하는 고장 위치법의 적용을 위해 필요한 계통에서의 연평균 1선지락 사고율은 표 11과 같다. 선정 고장 위치에서의 1선지락사고 모의를 위한 상세 계통 데이터는 표 12에 정리하였다.

표 11. 선로의 사고율 데이터

사고 유형	선로 사고율 [fault/100km-year]
1선 지락사고 (SLGF)	4.496

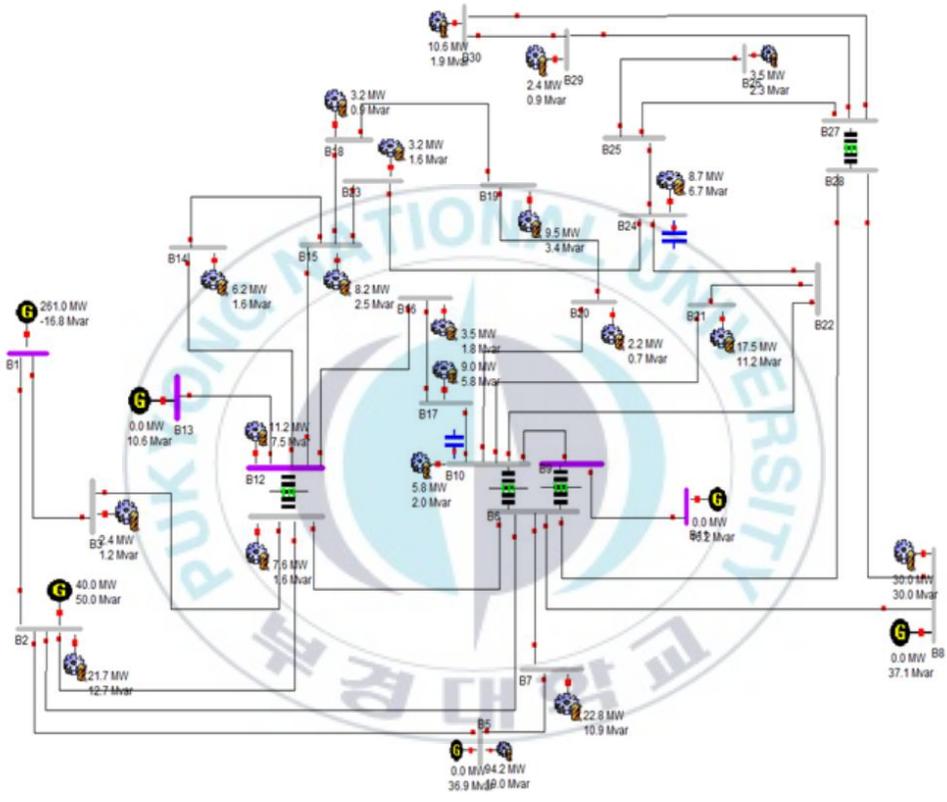


그림 15. IEEE-30 모선 계통도

3.2 사고전압 계산과 취약지역의 결정

고장 위치법을 적용하기 위해 먼저 계통에서의 고장 위치를 선정하였다. 37개의 선로를 등간격으로 5등분하고 각 구간의 중앙을 고장 위치로 선정하였다. 선로당 고장 위치는 양쪽 모선을 포함 총 7개가 된다. 선정된 고장 위치에서 PowerWorld simulator를 이용하여 1선지락사고를 모의하였다. PowerWorld simulator는 1선지락사고의 경우 기본적으로 A상 지락을 기준으로 계산한다. 따라서 전압상승은 B상과 C상에서 나타나게 된다. 선정된 모든 고장 위치에서 1선지락 사고를 모의하고 3개의 민감 부하단에서의 각 사고로 인한 B상 및 C상의 전압을 기록하였다. 표 13~15는 각 고장위치에서의 1선지락사고로 인한 각 민감 부하 모선의 건전상의 전압계산 결과이다. 각 표에서 음영이 들어간 부분은 한계 전압 1.2[p.u.] 이상의 전압상승이 발생한 지점이다.

표 12. IEEE-30 모선 계통 데이터

Circuit	Circuit	Voltage (kV)	Z1(p.u.)			Z0(p.u.)			Tap	Length (km)
	Type		R1	X1	B1	R0	X0	B0	Ratio	
1-2	Line	132	0.0192	0.0575	0.0528	0.0480	0.1438	0.1320		82.4
1-3	Line	132	0.0452	0.1652	0.0408	0.1130	0.4130	0.1020		95.7
2-4	Line	132	0.0570	0.1737	0.0368	0.1425	0.4343	0.0920		96.8
2-5	Line	132	0.0472	0.1983	0.0418	0.1180	0.4958	0.1045		99.8
2-6	Line	132	0.0581	0.1763	0.0374	0.1453	0.4408	0.0935		97.1
3-4	Line	132	0.0132	0.0379	0.0084	0.0330	0.0948	0.0210		80
4-6	Line	132	0.0119	0.0414	0.0090	0.0298	0.1035	0.0225		80.4
5-7	Line	132	0.0460	0.1160	0.0204	0.1150	0.2900	0.0510		89.6
6-7	Line	132	0.0267	0.0820	0.0170	0.0668	0.205	0.0425		85.4
6-8	Line	132	0.012	0.0420	0.0090	0.0300	0.105	0.0225		80.5
6-28	Line	132	0.0169	0.0599	0.0130	0.0423	0.1498	0.0325		82.7
8-28	Line	132	0.0636	0.2000	0.0428	0.159	0.500	0.1070		100
9-10	Line	33	0.0000	0.1100	0.0000	0.000	0.2750	0.0000		12.8
9-11	Line	33	0.0000	0.2080	0.0000	0.000	0.5200	0.0000		16.7
10-17	Line	33	0.0324	0.0845	0.0000	0.0810	0.2113	0.0000		12.5
10-20	Line	33	0.0936	0.2090	0.0000	0.2340	0.5225	0.0000		16.9
10-21	Line	33	0.0348	0.0749	0.0000	0.0870	0.1873	0.0000		12.3
10-22	Line	33	0.0727	0.1499	0.0000	0.1818	0.3748	0.0000		14.6
12-13	Line	33	0.0000	0.1400	0.0000	0.000	0.3500	0.0000		14.3
12-14	Line	33	0.1231	0.2559	0.0000	0.3078	0.6398	0.0000		18.5
12-15	Line	33	0.0662	0.1304	0.0000	0.1655	0.3260	0.0000		14.3
12-16	Line	33	0.0945	0.1987	0.0000	0.2363	0.4968	0.0000		16.4
14-15	Line	33	0.221	0.1997	0.0000	0.5525	0.4993	0.0000		16.6
15-18	Line	33	0.1073	0.2185	0.0000	0.2683	0.5463	0.0000		17.3
15-23	Line	33	0.1000	0.2020	0.0000	0.2500	0.5050	0.0000		16.6
16-17	Line	33	0.0524	0.1923	0.0000	0.1310	0.4808	0.0000		15.9
18-19	Line	33	0.0639	0.1292	0.0000	0.1598	0.3230	0.0000		13.7
19-20	Line	33	0.0340	0.0680	0.0000	0.0850	0.1700	0.0000		10.8
21-22	Line	33	0.0116	0.0236	0.0000	0.029	0.0590	0.0000		10
22-24	Line	33	0.1150	0.1790	0.0000	0.2875	0.4475	0.0000		15
23-24	Line	33	0.1320	0.2700	0.0000	0.3300	0.6750	0.0000		19
24-25	Line	33	0.1885	0.3292	0.0000	0.4713	0.8230	0.0000		20.9
25-26	Line	33	0.2544	0.3800	0.0000	0.636	0.9500	0.0000		22.6
25-27	Line	33	0.1093	0.2087	0.0000	0.2733	0.5218	0.0000		16.9
27-29	Line	33	0.2198	0.4153	0.0000	0.5495	1.0383	0.0000		23.8
27-30	Line	33	0.3202	0.6027	0.0000	0.8005	1.5068	0.0000		30
29-30	Line	33	0.2399	0.4533	0.0000	0.5998	1.1333	0.0000		25
4-12	TR	132-33	0.0000	0.2560	2.3300	0.000	0.2560	0.0000	09320	
6-9	TR	132-33	0.0000	0.2080	2.4450	0.000	0.2080	0.0000	09780	
6-10	TR	132-33	0.0000	0.5560	2.4225	0.000	0.5560	0.0000	09690	
27-28	TR	132-33	0.0000	0.3960	2.4200	0.000	0.3960	0.000	09680	

표 13. 1선지락사고로 인한 B상 및 C상의 사고 전압 (15번 모선)

선로	상	Fault positions [%]						
		0	10	30	50	70	90	100
1-2	B	0.9574	0.9586	0.9611	0.9634	0.9656	0.9679	0.9691
	C	0.9676	0.9660	0.9625	0.9584	0.9534	0.9474	0.9440
1-3	B	0.9574	0.9617	0.9681	0.9723	0.9749	0.9760	0.9761
	C	0.9676	0.9688	0.9691	0.9669	0.9623	0.9550	0.9500
2-4	B	0.9691	0.9718	0.9757	0.9779	0.9785	0.9779	0.9773
	C	0.9440	0.9495	0.9547	0.9545	0.9497	0.9395	0.9314
2-5	B	0.9691	0.9760	0.9866	0.9941	0.9997	1.0039	1.0055
	C	0.9440	0.9485	0.9537	0.9553	0.9538	0.9494	0.9458
2-6	B	0.9691	0.9722	0.9771	0.9801	0.9818	0.9826	0.9831
	C	0.9440	0.9489	0.9531	0.9518	0.9455	0.9326	0.9224
3-4	B	0.9761	0.9762	0.9764	0.9766	0.9768	0.9772	0.9773
	C	0.9500	0.9486	0.9455	0.9420	0.9381	0.9338	0.9314
4-6	B	0.9773	0.9780	0.9793	0.9805	0.9816	0.9826	0.9831
	C	0.9314	0.9310	0.9299	0.9284	0.9264	0.9239	0.9224
4-12	B	1.3957						1.4057
	C	1.2377						1.2393
5-7	B	1.0055	1.0045	1.0027	1.0010	0.9992	0.9974	0.9965
	C	0.9458	0.9477	0.9502	0.9510	0.9504	0.9483	0.9465
6-7	B	0.9831	0.9846	0.9875	0.9903	0.9929	0.9954	0.9965
	C	0.9224	0.9265	0.9332	0.9384	0.9423	0.9454	0.9465
6-8	B	0.9831	0.9840	0.9857	0.9873	0.9888	0.9901	0.9908
	C	0.9831	0.9241	0.927	0.9295	0.9314	0.9329	0.9336
6-9	B	0.9831						1.3266
	C	0.9831						1.1604
6-10	B	0.9831						1.3671
	C	0.9831						1.1849
6-28	B	0.9831	0.9840	0.9858	0.9874	0.9888	0.9900	0.9905
	C	0.9831	0.9261	0.9323	0.9373	0.9413	0.9444	0.9458
8-28	B	0.9908	0.9919	0.9936	0.9943	0.9938	0.9919	0.9905
	C	0.9336	0.9424	0.9525	0.9565	0.9558	0.9506	0.9458
9-10	B	1.3266	1.3293	1.3355	1.3428	1.3515	1.3616	1.3671
	C	1.1604	1.1625	1.1668	1.1715	1.1766	1.1821	1.1849
9-11	B	1.3266	1.3120	1.2855	1.2619	1.2406	1.2210	1.2118
	C	1.1604	1.1536	1.1409	1.1289	1.1174	1.1063	1.1008
10-17	B	1.3671	1.3626	1.3544	1.3472	1.3411	1.3358	1.3335
	C	1.1849	1.1811	1.1744	1.1688	1.1642	1.1605	1.1588
10-20	B	1.3671	1.3546	1.3347	1.3202	1.3099	1.3029	1.3005
	C	1.1849	1.1738	1.1578	1.1476	1.1414	1.1380	1.1372
10-21	B	1.3671	1.3618	1.3529	1.3463	1.3416	1.3387	1.3379
	C	1.1849	1.1796	1.1712	1.1651	1.1610	1.1586	1.1580

10-22	B	1.3671	1.3560	1.3404	1.3321	1.3300	1.3338	1.3381
	C	1.1849	1.1735	1.1585	1.1512	1.1498	1.1539	1.1581
12-13	B	1.4057	1.3921	1.3665	1.3426	1.3203	1.2993	1.2892
	C	1.2393	1.2312	1.2157	1.2009	1.1865	1.1725	1.1656
12-14	B	1.4057	1.3851	1.3560	1.3386	1.3296	1.3274	1.3287
	C	1.2393	1.2144	1.1814	1.1616	1.1495	1.1423	1.1400
12-15	B	1.4057	1.4005	1.3933	1.3899	1.3902	1.3938	1.3970
	C	1.2393	1.2358	1.2327	1.2339	1.2387	1.2471	1.2525
12-16	B	1.4057	1.3913	1.3679	1.3503	1.3372	1.3279	1.3245
	C	1.2393	1.2213	1.1942	1.1757	1.1633	1.1553	1.1527
14-15	B	1.3287	1.3317	1.3399	1.3515	1.3671	1.3864	1.3970
	C	1.1400	1.1397	1.1449	1.1586	1.1834	1.2240	1.2525
15-18	B	1.3970	1.3814	1.3561	1.3370	1.3224	1.3117	1.3076
	C	1.2525	1.2341	1.2053	1.1843	1.1688	1.1572	1.1527
15-23	B	1.3970	1.3826	1.3589	1.3404	1.3260	1.3150	1.3105
	C	1.2525	1.2353	1.2078	1.1874	1.1718	1.1599	1.1551
16-17	B	1.3245	1.3218	1.3188	1.3189	1.3221	1.3287	1.3335
	C	1.1527	1.1515	1.1502	1.1504	1.1523	1.1561	1.1589
18-19	B	1.3076	1.3055	1.3020	1.2995	1.2979	1.2972	1.2972
	C	1.1527	1.1503	1.1461	1.1428	1.1402	1.1385	1.1378
19-20	B	1.2972	1.2972	1.2975	1.2981	1.2989	1.2999	1.3006
	C	1.1378	1.1375	1.1371	1.1368	1.1368	1.1370	1.1372
21-22	B	1.3379	1.3378	1.3376	1.3375	1.3377	1.3379	1.3381
	C	1.1581	1.1579	1.1577	1.1576	1.1577	1.1579	1.1581
22-24	B	1.3381	1.3320	1.3219	1.3144	1.3091	1.3059	1.3050
	C	1.1581	1.1515	1.1420	1.1364	1.1338	1.1338	1.1346
23-24	B	1.3105	1.3055	1.2986	1.2956	1.2963	1.3010	1.3050
	C	1.1551	1.1495	1.1411	1.1357	1.1332	1.1334	1.1346
24-25	B	1.3050	1.2899	1.2653	1.2463	1.2313	1.2193	1.2142
	C	1.1346	1.1226	1.1054	1.0940	1.0862	1.0808	1.0787
25-26	B	1.2142	1.2045	1.1879	1.1741	1.1626	1.1528	1.1485
	C	1.0787	1.0725	1.0631	1.0566	1.0518	1.0483	1.0469
25-27	B	1.2142	1.2112	1.2058	1.2011	1.1970	1.1933	1.1916
	C	1.0787	1.0777	1.0759	1.0745	1.0734	1.0725	1.0722
27-28	B	1.1916						0.9905
	C	1.0722						0.9458
27-29	B	1.1916	1.1838	1.1712	1.1617	1.1546	1.1492	1.1471
	C	1.0722	1.0686	1.0634	1.0599	1.0575	1.0559	1.0553
27-30	B	1.1916	1.1805	1.1644	1.1537	1.1467	1.1422	1.1409
	C	1.0722	1.0672	1.0609	1.0573	1.0553	1.0542	1.0540
29-30	B	1.1471	1.1451	1.1422	1.1405	1.1398	1.1402	1.1409
	C	1.0552	1.0547	1.0539	1.0535	1.0535	1.0537	1.0540

표 14. 1선지락사고로 인한 B상 및 C상의 사고 전압 (20번 모선)

선로	상	Fault positions [%]						
		0	10	30	50	70	90	100
1-2	B	0.9495	0.9507	0.9531	0.9554	0.9576	0.9599	0.9611
	C	0.9598	0.9583	0.9547	0.9504	0.9453	0.9393	0.9358
1-3	B	0.9495	0.9539	0.9604	0.9647	0.9673	0.9685	0.9686
	C	0.9598	0.9612	0.9616	0.9596	0.9552	0.9482	0.9434
2-4	B	0.9611	0.9638	0.9679	0.9702	0.9709	0.9703	0.9698
	C	0.9358	0.9415	0.9470	0.9472	0.9428	0.9330	0.9252
2-5	B	0.9611	0.9679	0.9784	0.9860	0.9915	0.9957	0.9973
	C	0.9358	0.9402	0.9452	0.9466	0.9449	0.9402	0.9364
2-6	B	0.9611	0.9641	0.9688	0.9717	0.9733	0.9741	0.9747
	C	0.9358	0.9405	0.9443	0.9426	0.9357	0.9221	0.9116
3-4	B	0.9686	0.9687	0.9689	0.9691	0.9694	0.9696	0.9698
	C	0.9434	0.9420	0.9389	0.9356	0.9318	0.9275	0.9252
4-6	B	0.9698	0.9704	0.9715	0.9725	0.9734	0.9743	0.9747
	C	0.9252	0.9244	0.9224	0.9200	0.9170	0.9135	0.9116
4-12	B	0.9698						1.3732
	C	0.9252						1.1754
5-7	B	0.9973	0.9963	0.9945	0.9927	0.9909	0.9891	0.9882
	C	0.9364	0.9383	0.9407	0.9414	0.9407	0.9383	0.9365
6-7	B	0.9747	0.9762	0.9791	0.9819	0.9845	0.9870	0.9882
	C	0.9116	0.9157	0.9226	0.9280	0.9321	0.9353	0.9365
6-8	B	0.9747	0.9756	0.9773	0.9789	0.9804	0.9817	0.9824
	C	0.9116	0.9133	0.9163	0.9187	0.9207	0.9223	0.9229
6-9	B	0.9747						1.3625
	C	0.9116						1.2177
6-10	B	0.9747						1.4066
	C	0.9116						1.2464
6-28	B	0.9747	0.9756	0.9773	0.9788	0.9802	0.9813	0.9818
	C	0.9116	0.9154	0.9218	0.9269	0.9311	0.9344	0.9358
8-28	B	0.9824	0.9834	0.9850	0.9857	0.9851	0.9832	0.9818
	C	0.9229	0.9320	0.9425	0.9465	0.9460	0.9407	0.9358
9-10	B	1.3625	1.3652	1.3718	1.3797	1.3892	1.4003	1.4066
	C	1.2177	1.2199	1.2247	1.2301	1.2361	1.2428	1.2464
9-11	B	1.3625	1.3451	1.3135	1.2855	1.2603	1.2372	1.2263
	C	1.2177	1.2077	1.1889	1.1715	1.1550	1.1392	1.1315
10-17	B	1.4066	1.4000	1.3880	1.3774	1.3680	1.3598	1.3561
	C	1.2464	1.2390	1.2256	1.2140	1.2039	1.1950	1.1910
10-20	B	1.4066	1.3973	1.3837	1.3755	1.3716	1.3713	1.3724
	C	1.2464	1.2406	1.2342	1.2330	1.2356	1.2414	1.2454
10-21	B	1.4066	1.3998	1.3885	1.3798	1.3733	1.3690	1.3676
	C	1.2464	1.2383	1.2250	1.2149	1.2075	1.2024	1.2006

10-22	B	1.4066	1.3930	1.3737	1.3628	1.3590	1.3621	1.3662
	C	1.2464	1.2299	1.2076	1.1954	1.1910	1.1936	1.1976
12-13	B	1.3732	1.3611	1.3381	1.3168	1.2968	1.2779	1.2688
	C	1.1754	1.1694	1.1578	1.1467	1.1359	1.1253	1.1201
12-14	B	1.3732	1.3532	1.3247	1.3071	1.2975	1.2942	1.2947
	C	1.1754	1.1541	1.1259	1.1088	1.0980	1.0910	1.0885
12-15	B	1.3732	1.3674	1.3587	1.3538	1.3521	1.3536	1.3555
	C	1.1754	1.1706	1.1647	1.1626	1.1636	1.1674	1.1704
12-16	B	1.3732	1.3623	1.3451	1.3329	1.3247	1.3199	1.3187
	C	1.1754	1.1658	1.1529	1.1460	1.1436	1.1447	1.1465
14-15	B	1.2947	1.2969	1.3037	1.3138	1.3278	1.3455	1.3555
	C	1.0885	1.0873	1.0895	1.0987	1.1168	1.1479	1.1704
15-18	B	1.3555	1.3479	1.3366	1.3298	1.3267	1.3267	1.3278
	C	1.1704	1.1667	1.1630	1.1632	1.1663	1.1720	1.1758
15-23	B	1.3555	1.3447	1.3271	1.3138	1.3039	1.2970	1.2944
	C	1.1704	1.1601	1.1445	1.1335	1.1259	1.1208	1.1190
16-17	B	1.3187	1.3186	1.3208	1.3261	1.3350	1.3479	1.3561
	C	1.1465	1.1486	1.1542	1.1616	1.1712	1.1836	1.1910
18-19	B	1.3278	1.3288	1.3315	1.3353	1.3401	1.3461	1.3495
	C	1.1758	1.1783	1.1841	1.1909	1.1987	1.2078	1.2128
19-20	B	1.3495	1.3514	1.3554	1.3598	1.3645	1.3697	1.3724
	C	1.2128	1.2156	1.2213	1.2276	1.2343	1.2415	1.2454
21-22	B	1.3676	1.3672	1.3667	1.3663	1.3661	1.3661	1.3662
	C	1.2006	1.2001	1.1992	1.1985	1.1980	1.1977	1.1976
22-24	B	1.3662	1.3577	1.3431	1.3316	1.3227	1.3162	1.3137
	C	1.1976	1.1852	1.1658	1.1519	1.1422	1.1357	1.1336
23-24	B	1.2944	1.2919	1.2899	1.2915	1.2971	1.3069	1.3137
	C	1.1190	1.1173	1.1160	1.1173	1.1214	1.1285	1.1336
24-25	B	1.3137	1.2976	1.2714	1.2512	1.2353	1.2225	1.2171
	C	1.1336	1.1205	1.1017	1.0892	1.0806	1.0746	1.0723
25-26	B	1.2171	1.2068	1.1890	1.1744	1.1621	1.1517	1.1471
	C	1.0723	1.0657	1.0558	1.0488	1.0438	1.0401	1.0387
25-27	B	1.2171	1.2139	1.2082	1.2032	1.1988	1.1949	1.1932
	C	1.0723	1.0711	1.0691	1.0675	1.0662	1.0652	1.0648
27-28	B	1.1932						0.9818
	C	1.0648						0.9358
27-29	B	1.1932	1.1848	1.1714	1.1613	1.1538	1.1480	1.1457
	C	1.0648	1.0610	1.0555	1.0519	1.0494	1.0477	1.0471
27-30	B	1.1932	1.1848	1.1714	1.1613	1.1538	1.1480	1.1457
	C	1.0648	1.0610	1.0555	1.0519	1.0494	1.0477	1.0471
29-30	B	1.1457	1.1437	1.1406	1.1387	1.1381	1.1385	1.1392
	C	1.0471	1.0465	1.0458	1.0454	1.0453	1.0456	1.0458

표 15. 1선지락사고로 인한 B상 및 C상의 사고 전압 (25번 모선)

선로	상	Fault positions [%]						
		0	10	30	50	70	90	100
1-2	B	0.9359	0.9372	0.9396	0.9420	0.9444	0.9469	0.9482
	C	0.9440	0.9423	0.9385	0.9340	0.9287	0.9223	0.9187
1-3	B	0.9359	0.9404	0.9472	0.9518	0.9546	0.9561	0.9564
	C	0.9440	0.9454	0.9460	0.9440	0.9396	0.9325	0.9275
2-4	B	0.9482	0.9509	0.9551	0.9576	0.9586	0.9584	0.9582
	C	0.9187	0.9247	0.9307	0.9311	0.9268	0.9169	0.9090
2-5	B	0.9482	0.9550	0.9656	0.9732	0.9789	0.9832	0.9850
	C	0.9187	0.9232	0.9282	0.9295	0.9277	0.9225	0.9185
2-6	B	0.9482	0.9510	0.9555	0.9584	0.9600	0.9612	0.9622
	C	0.9187	0.9234	0.9270	0.9249	0.9174	0.9028	0.8914
3-4	B	0.9564	0.9565	0.9568	0.9571	0.9575	0.9579	0.9582
	C	0.9275	0.9261	0.9230	0.9196	0.9157	0.9114	0.9090
4-6	B	0.9582	0.9586	0.9595	0.9603	0.9610	0.9618	0.9622
	C	0.9090	0.9078	0.9051	0.9020	0.8982	0.8939	0.8914
4-12	B	0.9582						1.4144
	C	0.9090						1.2597
5-7	B	0.9850	0.9839	0.9819	0.9800	0.9781	0.9763	0.9753
	C	0.9185	0.9204	0.9228	0.9235	0.9226	0.9200	0.9181
6-7	B	0.9622	0.9635	0.9663	0.9690	0.9717	0.9742	0.9753
	C	0.8914	0.8959	0.9032	0.9089	0.9133	0.9167	0.9181
6-8	B	0.9622	0.9630	0.9645	0.9659	0.9673	0.9685	0.9691
	C	0.8914	0.8930	0.8956	0.8977	0.8993	0.9005	0.9009
6-9	B	0.9622						1.3618
	C	0.8914						1.2192
6-10	B	0.9622						1.4144
	C	0.8914						1.2597
6-28	B	0.9622	0.9627	0.9636	0.9643	0.9649	0.9654	0.9655
	C	0.8914	0.8939	0.8977	0.9005	0.9024	0.9036	0.9039
8-28	B	0.9691	0.9695	0.9703	0.9703	0.9692	0.9670	0.9655
	C	0.9009	0.9095	0.9188	0.9213	0.9187	0.9106	0.9039
9-10	B	1.3618	1.3654	1.3735	1.3831	1.3943	1.4073	1.4144
	C	1.2192	1.2225	1.2296	1.2373	1.2457	1.2548	1.2597
9-11	B	1.3618	1.3654	1.3735	1.3831	1.3943	1.4073	1.4144
	C	1.2192	1.2225	1.2296	1.2373	1.2457	1.2548	1.2597
10-17	B	1.4144	1.4073	1.3943	1.3829	1.3727	1.3638	1.3597
	C	1.2597	1.2516	1.2371	1.2245	1.2136	1.2040	1.1996
10-20	B	1.4144	1.3958	1.3655	1.3426	1.3252	1.3122	1.3071
	C	1.2597	1.2377	1.2044	1.1809	1.1640	1.1518	1.1471
10-21	B	1.4144	1.4095	1.4016	1.3963	1.3934	1.3927	1.3931
	C	1.2597	1.2551	1.2486	1.2451	1.2442	1.2457	1.2473

10-22	B	1.4144	1.4029	1.3875	1.3809	1.3820	1.3906	1.3980
	C	1.2597	1.2473	1.2326	1.2284	1.2328	1.2457	1.2558
12-13	B	1.3727	1.3602	1.3367	1.3149	1.2944	1.2751	1.2659
	C	1.1864	1.1799	1.1673	1.1552	1.1436	1.1323	1.1267
12-14	B	1.3727	1.3521	1.3228	1.3049	1.2952	1.2920	1.2927
	C	1.1864	1.1635	1.1332	1.1150	1.1036	1.0965	1.0941
12-15	B	1.3727	1.3667	1.3579	1.3530	1.3515	1.3532	1.3554
	C	1.1864	1.1820	1.1771	1.1762	1.1787	1.1843	1.1882
12-16	B	1.3727	1.3617	1.3444	1.3322	1.3241	1.3196	1.3185
	C	1.1864	1.1757	1.1611	1.1531	1.1499	1.1507	1.1524
14-15	B	1.2927	1.2951	1.3022	1.3128	1.3271	1.3453	1.3554
	C	1.0941	1.0933	1.0967	1.1077	1.1285	1.1634	1.1882
15-18	B	1.3554	1.3435	1.3246	1.3110	1.3014	1.2952	1.2933
	C	1.1882	1.1762	1.1581	1.1459	1.1379	1.1331	1.1318
15-23	B	1.3554	1.3481	1.3371	1.3301	1.3264	1.3256	1.3261
	C	1.1882	1.1851	1.1822	1.1827	1.1858	1.1913	1.1949
16-17	B	1.3185	1.3186	1.3212	1.3273	1.3370	1.3509	1.3597
	C	1.1524	1.1545	1.1603	1.1681	1.1783	1.1916	1.1996
18-19	B	1.2933	1.2924	1.2915	1.2916	1.2926	1.2945	1.2958
	C	1.1318	1.1313	1.1308	1.1313	1.1325	1.1346	1.1360
19-20	B	1.2958	1.2966	1.2984	1.3005	1.3029	1.3056	1.3071
	C	1.1360	1.1368	1.1386	1.1406	1.1430	1.1456	1.1471
21-22	B	1.3931	1.3934	1.3940	1.3949	1.3960	1.3973	1.3980
	C	1.2473	1.2478	1.2492	1.2507	1.2526	1.2546	1.2557
22-24	B	1.3980	1.3951	1.3917	1.3914	1.3938	1.3988	1.4023
	C	1.2557	1.2563	1.2610	1.2695	1.2817	1.2973	1.3064
23-24	B	1.3261	1.3279	1.3349	1.3466	1.3638	1.3874	1.4023
	C	1.1949	1.2004	1.2143	1.2327	1.2565	1.2874	1.3064
24-25	B	1.4023	1.3985	1.3945	1.3937	1.3954	1.3990	1.4014
	C	1.3064	1.3113	1.3224	1.3346	1.3478	1.3617	1.3690
25-26	B	1.4014	1.3792	1.3413	1.3104	1.2847	1.2630	1.2534
	C	1.3690	1.3387	1.2896	1.2518	1.2221	1.1982	1.1881
25-27	B	1.4014	1.3957	1.3853	1.3764	1.3686	1.3620	1.3590
	C	1.3690	1.3641	1.3554	1.3484	1.3427	1.3383	1.3365
27-28	B	1.3590						0.9655
	C	1.3365						0.9039
27-29	B	1.3590	1.3399	1.3096	1.2872	1.2703	1.2575	1.2525
	C	1.3365	1.3143	1.2803	1.2559	1.2382	1.2252	1.2201
27-30	B	1.3590	1.3321	1.2935	1.2681	1.2514	1.2408	1.2375
	C	1.3365	1.3055	1.2629	1.2362	1.2195	1.2096	1.2066
29-30	B	1.2525	1.2479	1.2410	1.2369	1.2353	1.2361	1.2375
	C	1.2201	1.2156	1.2089	1.2051	1.2038	1.2051	1.2066

건전상의 사고전압 계산 결과로부터 한계 전압 1.2[p.u.]에 대한 취약지역을 결정할 수 있다. 민감 부하단의 전압을 한계 전압 이상으로 상승시키는 사고 위치들을 모두 찾고 영역화하였다. 그림 16과 17은 15번 모선의 B상과 C상의 취약지역을 나타낸다. 즉, 굵은 선으로 표시된 구간에서 1선지락사고가 발생하면 15번 모선에 1.2[p.u.] 이상의 전압상승이 발생함을 나타낸다. B상 및 C상의 취약지역에 포함된 선로 구간의 총 길이는 각각 319.76[km]와 47.01[km]로 계산되었다. 그림 18와 19는 20번 모선의 B상과 C상의 취약지역을 나타낸다. B상 및 C상의 취약지역에 포함된 선로 구간의 총 길이는 각각 319.76[km]와 76.72[km]이다. 그림 20과 21은 25번 모선의 취약지역으로 B상 및 C상의 취약지역에 포함된 선로 구간의 총 길이는 각각 423.42[km]와 239.74[km]로 나타났다. 전체적으로 25번 모선에 대한 취약지역이 가장 크게 나타났으며 이는 다른 모선에 비해 25번 모선이 순간전압상승을 경험할 확률이 높음을 의미한다.

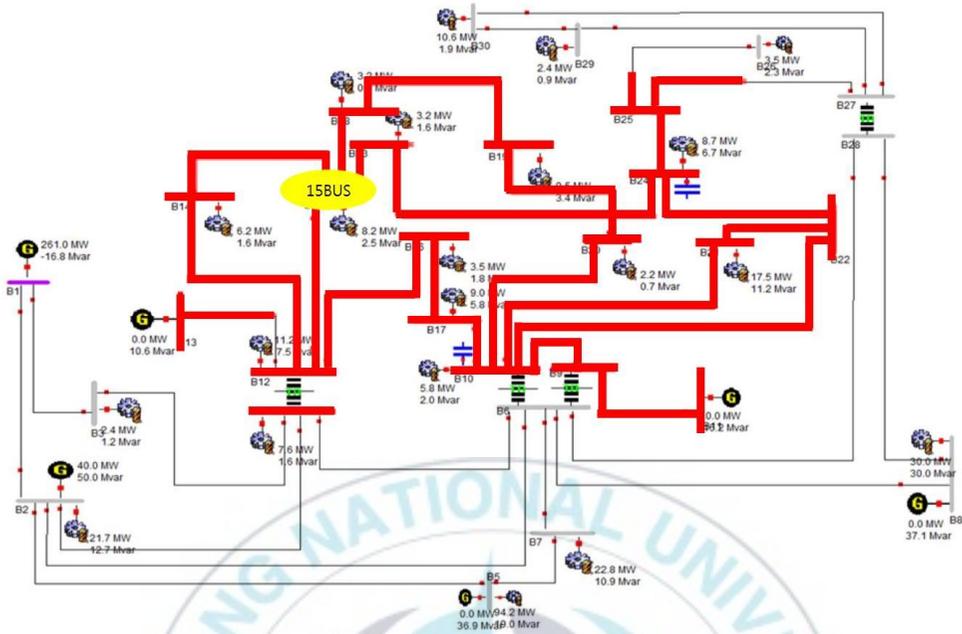


그림 16. 1선 지락 사고시 15번 모선의 B상 취약지역

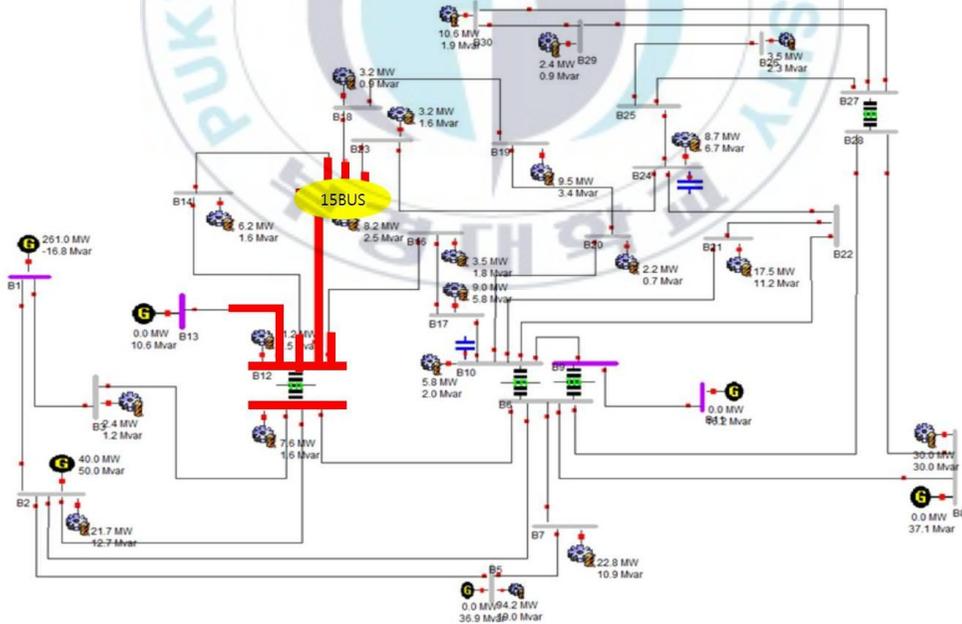


그림 17. 1선 지락 사고시 15번 모선의 C상 취약지역

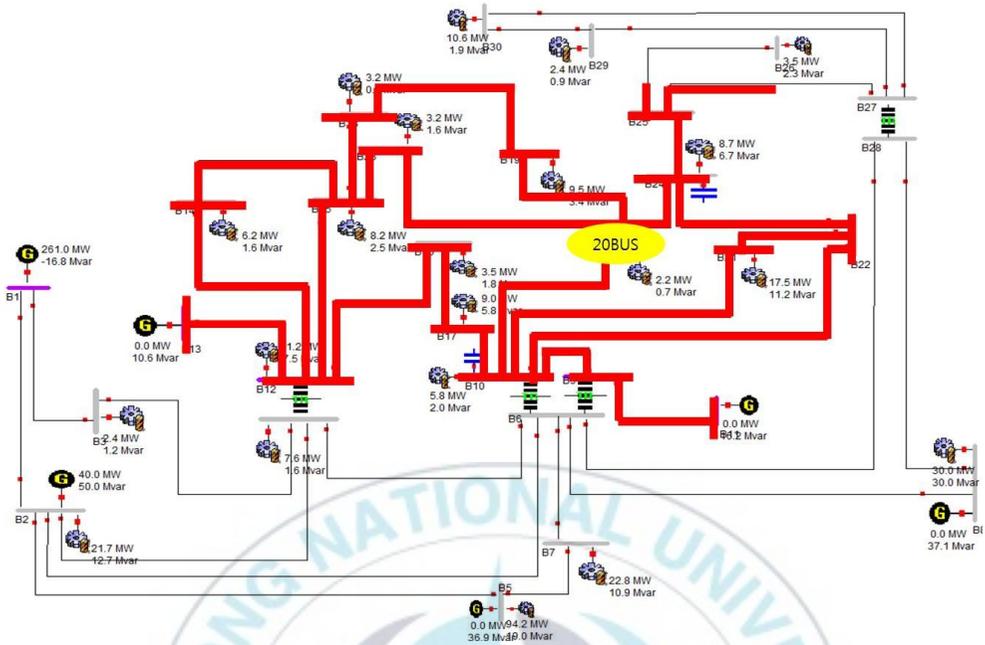


그림 18. 1선 지락 사고시 20번 모선의 B상 취약지역

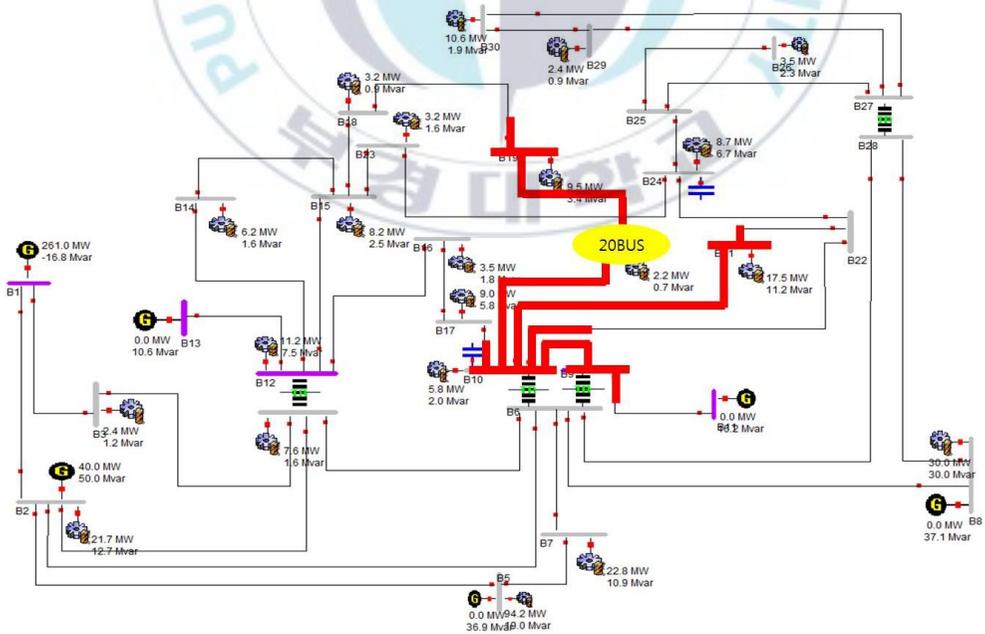


그림 19. 1선 지락 사고시 20번 모선의 C상 취약지역

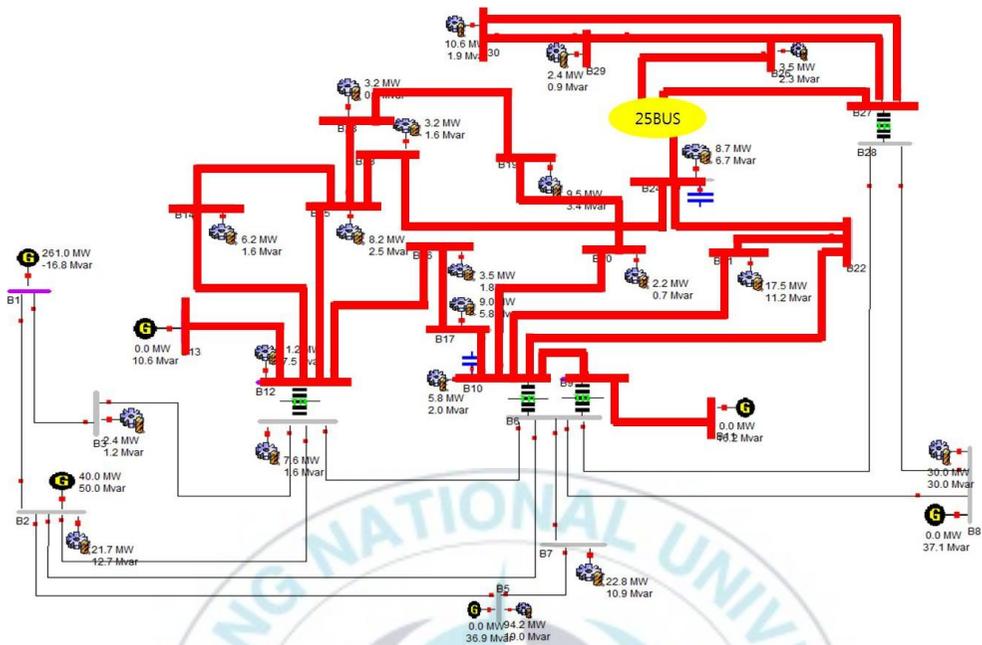


그림 20. 1선 지락 사고시 25번 모선의 B상 취약지역

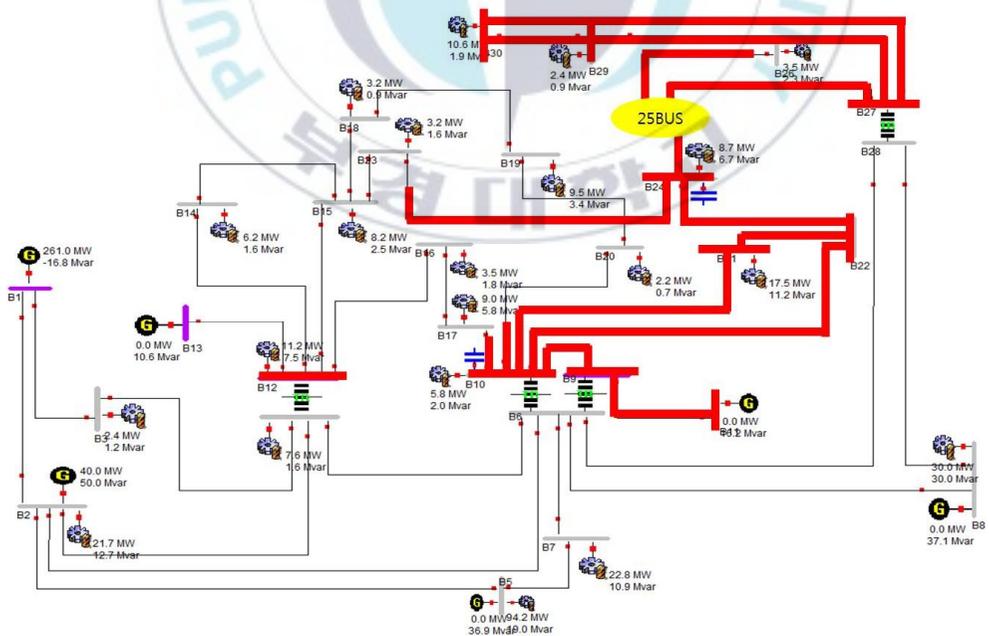


그림 21. 1선 지락 사고시 25번 모선의 C상 취약지역

3.3 고장 위치법의 적용과 순간전압상승 횟수 추산

선정된 모든 고장 위치에서의 1선지락사고 해석 결과와 각 모선에 대한 취약지역을 이용하여 연평균 순간전압상승 횟수를 추산하였다. 각 상별 취약지역에 포함된 선로 구간 길이를 계산하고 연평균 사고율을 적용하여 각 선로에서의 사고로 인한 전압상승 횟수를 추산하였다. 모든 선로에서의 횟수를 합산하여 각 민감 부하단에서의 연평균 횟수를 산출하였다. 표 16~21은 3개의 민감 부하단에 대한 B상 및 C상의 선로별 취약지역의 범위와 길이, 사고율을 적용한 순간전압상승 횟수를 나타낸다. 일반적으로 특정 부하단에 대한 연평균 발생횟수를 추산할 때는 3상 중 하나의 상에 대한 예상 횟수를 산출한다. 전력계통에서의 연평균 사고율은 선로의 단위 길이당 사고 발생 횟수를 평균적으로 산출한 값이므로 1선지락 사고 같은 경우 3상 중 하나의 상에 대한 사고율은 연평균 사고율의 1/3이 된다. 일반적으로 각 상에 지락 사고가 발생할 확률은 동일하다고 가정한다. 따라서 민감 부하단에서 하나의 상에 대한 순간전압상승 발생 횟수는 다음과 같이 산출한다.

$$ESF_{1\phi} = \frac{1}{3}(ESF_B + ESF_C) \dots\dots\dots (3-1)$$

여기서, $ESF_{1\phi}$ 는 1상에 대한 순간전압상승 횟수이고 ESF_B 및 ESF_C 는 B상과 C상에서의 순간전압상승 횟수 추산 결과이다.

따라서, 표 16~21의 각 상별 평가 결과로부터 식(3-1)을 적용하여 3상 중 하나의 상에 대한 연평균 순간전압상승 횟수를 표22와 같이 최종 추산하였다. 본 논문에서는 사고 발생의 지리적 영향 등을 고려하지 않았으며 전체 계통에서 일정하다고 가정하였으므로 취약지역의 범위가 가장 넓

은 25번 모선에서 순간전압상승 횟수가 9.938[swells/year]으로 가장 높게 산출되었다. 다른 모선에 비해 25번 모선에 있는 부하들이 연평균적으로 순간전압상승으로 인한 피해를 입을 가능성이 클 것으로 평가되었다.



표 16. B상의 취약지역과 순간전압상승 횟수 (15번 모선)

Circuit	AOV	AOV_length [km]	사고율	ESF _B
1-2	-	-	0.04496 [fault/km-yr]	-
1-3	-	-		-
2-4	-	-		-
2-5	-	-		-
2-6	-	-		-
3-4	-	-		-
4-6	-	-		-
5-7	-	-		-
6-7	-	-		-
6-8	-	-		-
6-28	-	-		-
8-28	-	-		-
9-10	$0 \leq p \leq 1.0$	12.8		0.5754
9-11	$0 \leq p \leq 1.0$	16.7		0.7508
10-17	$0 \leq p \leq 1.0$	12.5		0.5620
10-20	$0 \leq p \leq 1.0$	16.9		0.7598
10-21	$0 \leq p \leq 1.0$	12.3		0.5530
10-22	$0 \leq p \leq 1.0$	14.6		0.6564
12-13	$0 \leq p \leq 1.0$	14.3		0.6429
12-14	$0 \leq p \leq 1.0$	18.5		0.8317
12-15	$0 \leq p \leq 1.0$	14.3		0.6429
12-16	$0 \leq p \leq 1.0$	16.4		0.7373
14-15	$0 \leq p \leq 1.0$	16.6		0.7463
15-18	$0 \leq p \leq 1.0$	17.3		0.7778
15-23	$0 \leq p \leq 1.0$	16.6		0.7463
16-17	$0 \leq p \leq 1.0$	15.9		0.7148
18-19	$0 \leq p \leq 1.0$	13.7		0.6159
19-20	$0 \leq p \leq 1.0$	10.8		0.4855
21-22	$0 \leq p \leq 1.0$	10.0		0.4496
22-24	$0 \leq p \leq 1.0$	15.0		0.6744
23-24	$0 \leq p \leq 1.0$	19.0	0.8542	
24-25	$0 \leq p \leq 1.0$	20.9	0.9396	
25-26	$0 \leq p \leq 0.2$	4.52	0.2032	
25-27	$0 \leq p \leq 0.6$	10.14	0.4559	
27-29	-	-	-	
27-30	-	-	-	
29-30	-	-	-	
계		319.762		14.3757

표 17. C상의 취약지역과 순간전압상승 횟수 (15번 모선)

Circuit	AOV	AOV_length [km]	사고율	ESF _c
1-2	-	-	0.04496 [fault/km-yr]	-
1-3	-	-		-
2-4	-	-		-
2-5	-	-		-
2-6	-	-		-
3-4	-	-		-
4-6	-	-		-
5-7	-	-		-
6-7	-	-		-
6-8	-	-		-
6-28	-	-		-
8-28	-	-		-
9-10	-	-		-
9-11	-	-		-
10-17	-	-		-
10-20	-	-		-
10-21	-	-		-
10-22	-	-		-
12-13	$0 \leq p \leq 0.6$	8.85		-
12-14	$0 \leq p \leq 0.2$	3.70		-
12-15	$0 \leq p \leq 1.0$	14.3		-
12-16	$0 \leq p \leq 0.2$	3.28		-
14-15	$0.8 \leq p \leq 1.0$	3.32		-
15-18	$0 \leq p \leq 0.4$	6.92		-
15-23	$0 \leq p \leq 0.4$	6.64		-
16-17	-	-		-
18-19	-	-		-
19-20	-	-		-
21-22	-	-		-
22-24	-	-		-
23-24	-	-	-	
24-25	-	-	-	
25-26	-	-	-	
25-27	-	-	-	
27-29	-	-	-	
27-30	-	-	-	
29-30	-	-	-	
계		47.012		2.1015

표 18. B상의 취약지역과 순간전압상승 횟수 (20번 모선)

Circuit	AOV	AOV_length [km]	사고율	ESF _B
1-2	-	-	0.04496 [fault/km-yr]	-
1-3	-	-		-
2-4	-	-		-
2-5	-	-		-
2-6	-	-		-
3-4	-	-		-
4-6	-	-		-
5-7	-	-		-
6-7	-	-		-
6-8	-	-		-
6-28	-	-		-
8-28	-	-		-
9-10	0 ≤ p ≤ 1.0	12.8		0.5754
9-11	0 ≤ p ≤ 1.0	16.7		0.7508
10-17	0 ≤ p ≤ 1.0	12.5		0.5620
10-20	0 ≤ p ≤ 1.0	16.9		0.7598
10-21	0 ≤ p ≤ 1.0	12.3		0.5530
10-22	0 ≤ p ≤ 1.0	14.6		0.6564
12-13	0 ≤ p ≤ 1.0	14.3		0.6429
12-14	0 ≤ p ≤ 1.0	18.5		0.8317
12-15	0 ≤ p ≤ 1.0	14.3		0.6429
12-16	0 ≤ p ≤ 1.0	16.4		0.7373
14-15	0 ≤ p ≤ 1.0	16.6		0.7463
15-18	0 ≤ p ≤ 1.0	17.3		0.7778
15-23	0 ≤ p ≤ 1.0	16.6		0.7463
16-17	0 ≤ p ≤ 1.0	15.9		0.7148
18-19	0 ≤ p ≤ 1.0	13.7		0.6159
19-20	0 ≤ p ≤ 1.0	10.8		0.4855
21-22	0 ≤ p ≤ 1.0	10.0		0.4496
22-24	0 ≤ p ≤ 1.0	15.0		0.6744
23-24	0 ≤ p ≤ 1.0	19.0	0.8542	
24-25	0 ≤ p ≤ 1.0	20.9	0.9396	
25-26	0 ≤ p ≤ 0.2	4.52	0.2032	
25-27	0 ≤ p ≤ 0.6	10.14	0.4559	
27-29	-	-	-	
27-30	-	-	-	
29-30	-	-	-	
계		319.762		14.3757

표 19. C상의 취약지역과 순간전압상승 횟수 (20번 모선)

Circuit	AOV	AOV_length [km]	사고율	ESF _C	
1-2	-	-	0.04496 [fault/km-yr]	-	
1-3	-	-		-	
2-4	-	-		-	
2-5	-	-		-	
2-6	-	-		-	
3-4	-	-		-	
4-6	-	-		-	
5-7	-	-		-	
6-7	-	-		-	
6-8	-	-		-	
6-28	-	-		-	
8-28	-	-		-	
9-10	$0 \leq p \leq 1.0$	12.8		-	0.5754
9-11	$0 \leq p \leq 0.2$	3.34		-	0.1502
10-17	$0 \leq p \leq 0.8$	10.0		-	0.4496
10-20	$0 \leq p \leq 1.0$	16.9		-	0.7598
10-21	$0 \leq p \leq 1.0$	12.3		-	0.5530
10-22	$0 \leq p \leq 0.4$	5.84		-	0.2626
12-13	-	-		-	-
12-14	-	-		-	-
12-15	-	-		-	-
12-16	-	-		-	-
14-15	-	-		-	-
15-18	-	-		-	-
15-23	-	-		-	-
16-17	-	-		-	-
18-19	$0.8 \leq p \leq 1.0$	2.74		-	0.1232
19-20	$0 \leq p \leq 1.0$	10.8		-	0.4855
21-22	$0 \leq p \leq 0.2$	2.0		-	0.0899
22-24	-	-		-	-
23-24	-	-	-	-	
24-25	-	-	-	-	
25-26	-	-	-	-	
25-27	-	-	-	-	
27-29	-	-	-	-	
27-30	-	-	-	-	
29-30	-	-	-	-	
계		76.722		3.4492	

표 20. B상의 취약지역과 순간전압상승 횟수 (25번 모선)

Circuit	AOV	AOV_length [km]	사고율	ESF _B	
1-2	-	-	0.04496 [fault/km-yr]	-	
1-3	-	-		-	
2-4	-	-		-	
2-5	-	-		-	
2-6	-	-		-	
3-4	-	-		-	
4-6	-	-		-	
5-7	-	-		-	
6-7	-	-		-	
6-8	-	-		-	
6-28	-	-		-	
8-28	-	-		-	
9-10	0 ≤ p ≤ 1.0	12.8		-	0.5754
9-11	0 ≤ p ≤ 1.0	16.7		-	0.7508
10-17	0 ≤ p ≤ 1.0	12.5		-	0.5620
10-20	0 ≤ p ≤ 1.0	16.9		-	0.7598
10-21	0 ≤ p ≤ 1.0	12.3		-	0.5530
10-22	0 ≤ p ≤ 1.0	14.6		-	0.6564
12-13	0 ≤ p ≤ 1.0	14.3		-	0.6429
12-14	0 ≤ p ≤ 1.0	18.5		-	0.8317
12-15	0 ≤ p ≤ 1.0	14.3		-	0.6429
12-16	0 ≤ p ≤ 1.0	16.4		-	0.7373
14-15	0 ≤ p ≤ 1.0	16.6		-	0.7463
15-18	0 ≤ p ≤ 1.0	17.3		-	0.7778
15-23	0 ≤ p ≤ 1.0	16.6		-	0.7463
16-17	0 ≤ p ≤ 1.0	15.9		-	0.7148
18-19	0 ≤ p ≤ 1.0	13.7		-	0.6159
19-20	0 ≤ p ≤ 1.0	10.8		-	0.4855
21-22	0 ≤ p ≤ 1.0	10.0		-	0.4496
22-24	0 ≤ p ≤ 1.0	15.0		-	0.6744
23-24	0 ≤ p ≤ 1.0	19.0	-	0.8542	
24-25	0 ≤ p ≤ 1.0	20.9	-	0.9396	
25-26	0 ≤ p ≤ 1.0	22.6	-	1.0160	
25-27	0 ≤ p ≤ 1.0	16.9	-	0.7598	
27-29	0 ≤ p ≤ 1.0	23.8	-	1.0700	
27-30	0 ≤ p ≤ 1.0	30.0	-	1.3488	
29-30	0 ≤ p ≤ 1.0	25.0	-	1.1240	
계		423.42		19.0352	

표 21. C상의 취약지역과 순간전압상승 횟수 (25번 모선)

Circuit	AOV	AOV_length [km]	사고율	ESF _C	
1-2	-	-	0.04496 [fault/km-yr]	-	
1-3	-	-		-	
2-4	-	-		-	
2-5	-	-		-	
2-6	-	-		-	
3-4	-	-		-	
4-6	-	-		-	
5-7	-	-		-	
6-7	-	-		-	
6-8	-	-		-	
6-28	-	-		-	
8-28	-	-		-	
9-10	0 ≤ p ≤ 1.0	12.8		-	0.5754
9-11	0 ≤ p ≤ 1.0	16.7		-	0.7508
10-17	0 ≤ p ≤ 1.0	12.5		-	0.5620
10-20	0 ≤ p ≤ 0.4	6.76		-	0.3039
10-21	0 ≤ p ≤ 1.0	12.3		-	0.5530
10-22	-	-		-	-
12-13	-	-		-	-
12-14	-	-		-	-
12-15	-	-		-	-
12-16	-	-		-	-
14-15	-	-		-	-
15-18	-	-		-	-
15-23	-	-		-	-
16-17	-	-		-	-
18-19	-	-		-	-
19-20	-	-		-	-
21-22	0 ≤ p ≤ 1.0	10.0		-	0.4496
22-24	0 ≤ p ≤ 1.0	15.0		-	0.6744
23-24	0 ≤ p ≤ 1.0	19.0	-	0.8542	
24-25	0 ≤ p ≤ 1.0	20.9	-	0.9396	
25-26	0 ≤ p ≤ 0.8	18.08	-	0.8129	
25-27	0 ≤ p ≤ 1.0	16.9	-	0.7598	
27-29	0 ≤ p ≤ 1.0	23.8	-	1.0700	
27-30	0 ≤ p ≤ 1.0	30.0	-	1.3488	
29-30	0 ≤ p ≤ 1.0	25.0	-	1.1240	
계		239.742		10.7784	

표 22. 민감 부하단에서의 1상당 연평균 순간전압상승 횟수 추산 결과

구분	15번 모션	20번 모션	25번 모션
$ESF_{1\sigma}$ [swells/year]	5.492	5.942	9.938



제4장 결 론

본 논문에서는 1선지락사고(SLGF)로 인한 순간전압상승 평가 방법을 제안하였고 IEEE-30 테스트 계통을 이용하여 사례 연구를 수행하였다. 순간전압상승은 순간전압강하와 함께 중요한 단기전압품질 문제 중 하나이다. 순간전압강하에 비해 발생빈도는 낮지만 민감 부하의 전원부에 심각한 피해를 줄 수 있으며 기기의 오동작을 야기할 수도 있는 전압품질 문제이다. 앞으로 정밀 반도체 소자를 사용하는 민감 부하의 사용이 더욱 증가할 것으로 예상된다. 전압 변동에 민감한 부하를 포함한 계통에서는 순간전압강하뿐 아니라 전압상승에 대한 효과적인 관리 및 대책 수립이 필요하다. 효과적인 대책 수립을 위해서는 계통에서의 순간전압상승 발생 경향을 파악할 필요가 있으며 이를 위해 본 논문에서는 대표적인 순간전압강하 평가 방법의 하나인 고장 위치법을 순간전압상승 평가에 적합하도록 수정 적용하였다. 제안하는 방법을 이용하여 IEEE-30 모선 계통 임의의 세 부하단에 대한 순간전압상승 평가를 실시하였다. 각 선로를 5개의 구간으로 나누고 구간 중앙을 사고 위치로 선정하여 각 부하단에 대한 취약지역과 연평균 순간전압상승 횟수를 추산하였다. 제안하는 방법을 통해 계통내 관심 지점에서의 사고로 인한 장기적인 순간전압상승 발생 경향을 평가할 수 있으며 평가 결과를 바탕으로 민감 부하단에서의 효과적인 대책 수립이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, Electrical Power systems Quality, 3rd ed. Mcgraw-Hill, 2012
- [2] M. H. J. Bollen, Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions, Piscataway, NJ, IEEE Power Engineering Series, 2000.
- [3] 이근준, “순간정전 및 전압강하에 의한 피해사례와 대책”, 전기저널, pp. 48-58, 2014
- [4] 김장근, “2017년도 전력계통 운영실적“, 전력거래소, 2018. 03
- [5] 박창현, 이용욱, “원자력발전과 전력시스템”, 고려동, pp. 119-126, 2011
- [6] 김정훈, “송변전공학”, 문운당, pp. 495-497, 2010.
- [7] 송길영, “최신 송배전공학”, 동일출판사, 2013
- [8] M. H. J. Bollen. “Fast assessment methods for voltage sags in distribution systems,” IEEE Transm. Ind. Appl., vol. 32, no. 6, pp.1414-1423, Nov./Dec.1996.
- [9] L. Conrad, K. Little, and C. Grigg, “Predicting and preventing problems associated with remote fault-clearing voltage dips,” IEEE Transm. Ind. Appl., vol. 27, no. 1, pp. 167-172, Jan./Fed. 1991.
- [10] 권경란 “시뮬레이션에 기반한 순간전압강하 평가 기술에 대한 비교 분석 연구”, 부경대학교 산업대학원 공학석사 학위논문, 2017