creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

공학전문석사 학위 연구보고서

부하차단 데이터 기반 GIS 관리방안 연구

A Study on Gas Insulated Switchgear
Management Plan
based on Performance Data Analysis

2023년 2월

서울대학교 공학전문대학원
응용공학과 응용공학전공
조 진 성

부하차단 데이터 기반 GIS 관리방안 연구

A Study on Gas Insulated Switchgear Management Plan based on Performance Data Analysis

지도교수 윤 용 태

이 프로젝트 연구보고서를 공학전문석사 학위 연구보고서로 제출함

2022년 12월

서울대학교 공학전문대학원

응용공학과 응용공학전공

조 진 성

조진성의 공학전문석사 학위 연구보고서를 인준함

2022년 12월

위 원 장	김 국 헌	(인)
위 원	김 용 권	(인)
위 원	윤 용 태	(인)
위 원	김 희 집	(인)

국문초록

본 연구에서는 전력계통을 구성하는 주력 개폐장치인 Gas Insulated Switchgear(GIS)의 합리적인 노후설비 교체 판정을 위하여, 실제 설비 동작 데이터에 근거한 GIS 교체 우선순위 산출 방안을 제안하였다.

이를 위하여 현재의 GIS 교체 기준인 통계적 수명 관리의 한계를 검토하였고, 설비 상태 분석, 통계처리에 적합한 형태로 저장되어지지 않고 있는 기존 GIS 운전 데이터의 활용방안을 연구하였다.

기존 데이터는 GIS 운전수명을 판단하는 핵심인자인 차단기 동작횟수가 전류 차단과 무부하 차단 등 동작 종류의 구분 없이, 주간 단위 동작 실적과 총 동작 누계만이 GIS에 설치된 기계식 카운터에 의지하여 기록되어져 왔기에 설비관리에 활용하기에는 제약이 있었다.

이러한 제약을 극복하기 위해, GIS 차단기의 주간 단위 동작횟수가 특정한 패턴을 가진다는 가설 하에, 운전 중인 GIS 동작 기록 분석을 통하여 용도별 GIS의 동작 패턴을 확인하였고, 이를 활용하여 활용성이 없어 사장될 위기에 있던 기존 GIS 운전 데이터만으로도 전류 차단과

무부하 차단 등을 구분하는 알고리즘을 개발하였다.

향후, 해마다 2,000억원 가까운 예산이 소요되는 GIS 교체 계획 수립 시, 본 연구 결과를 활용한다면 실제 설비 노후화 상태에 근거한 설비 교체 계획 수립으로 전력 설비 신뢰도 향상과 합리적인 예산 집행에 기여하리라 판단한다.

주요어 : GIS, 설비 운전 데이터, GIS 동작 패턴, GIS 교체주기

학 번 : 2021-22291

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1

제 1 절 연구의 배경 및 목적 ····· 1

제 2 절 논문의 개요 및 구성 ····· 4

제 2 장 GIS 고장원인과 통계 ····· 6

제 1 절 GIS 설치현황 ····· 6

제 2 절 GIS 고장이론 ····· 8

제 3 절 GIS 고장통계 분석 ····· 10

제 3 장 기존 GIS 건전도 평가방법 ····· 13

제 1 절 GIS 교체기준 ····· 13

제 2 절 유사 연구자료 검토 ····· 16

제 3 절 실증 시험 사례 검토 ····· 26

제 4 장 부하차단 데이터 기반 GIS 관리방안 ····· 29

제 1 절 기존 GIS 데이터 활용 필요성 ····· 29

제 2 절 GIS 동작분석 알고리즘 ····· 31

제 3 절 GIS 교체 우선순위 산출 ····· 45

제 5 장 결 론 ····· 50

참고문헌 ····· 52

Abstract ····· 54

표 목 차

[표 2-1] 전력계통 전압별 GIS 운전 현황 ····· 6
[표 2-2] 최근 5개년 GIS 고장원인 ····· 10
[표 2-3] GIS 제작불량/자연열화 고장 추이 ····· 11
[표 3-1] GIS 설비 신뢰도 평가항목 ····· 13
[표 3-2] 관련 연구 사례 ····· 17
[표 3-3] 연도별 가공개폐기 고장현황 ····· 20
[표 3-4] 과전압에 의한 수명 평가 문헌 ····· 24
[표 3-5] 불소계 혼합가스 종류 및 조성비 ····· 26
[표 3-6] 170 kV EGIS 실증 결과 ····· 27
[표 3-7] 170 kV GIS 부하 차단횟수 산정 ····· 28
[표 4-1] 데이터 취득 내용 ····· 33
[표 4-2] 가공 송전선로 GIS 동작 패턴 ····· 34
[표 4-3] M.Tr GIS 동작 패턴 ····· 34
[표 4-4] 실제값과 예측값 차이 ····· 41
[표 4-5] 동작변화량 판정표 ····· 42
[표 4-6] CASE 1, 2 산출 방식 비교 ····· 46
[표 4-7] CASE 1, 2 장단점 비교 ····· 47
[표 4-8] CASE 1 산출 결과 ····· 48
[표 4-9] CASE 2 산출 결과 ····· 48

그 림 목 차

[그림 2-1] GIS 절연열화 진행과정 ····· 8
[그림 2-2] 사용연수에 따른 GIS 부품 고장 ····· 8
[그림 2-3] 사용연수에 따른 GIS 열화 고장 ····· 9
[그림 2-4] 절연열화에 따른 GIS 기대수명 ····· 12
[그림 3-1] 기존 GIS 교체 프로세스 ····· 13
[그림 3-2] 개선 GIS 교체 프로세스 ····· 14
[그림 3-3] 기계식 GIS 동작횟수 카운터 ····· 15
[그림 3-4] 연도별 가공개폐기 고장현황 ····· 18
[그림 3-5] 가공개폐기 MTTF와 신뢰도 ····· 19
[그림 3-6] 변전실증시험장 구성 ····· 22
[그림 4-1] 차단기 동작구분 알고리즘 개발 순서 ····· 32
[그림 4-2] 추출 데이터→ 리샘플링 ····· 35
[그림 4-3] GIS 사용기간, 용도 추가 ····· 36
[그림 4-4] 용도별 GIS 패턴(사용기간 대비) ····· 37
[그림 4-5] GIS 용도별 휴전조작 횟수 비율 ····· 38
[그림 4-6] GIS 용도별 고장동작 횟수 비율 ····· 39
[그림 4-7] GIS 동작횟수 예측 ····· 40
[그림 4-8] 차단기 총 동작횟수 구성 예 ····· 41
[그림 4-9] 차단기 동작변화량 ····· 43
[그림 4-10] 차단기 동작구간 구분 예 ····· 43
[그림 4-11] GIS 교체 우선순위 선정절차(안) ····· 44
[그림 4-12] GIS 용도별 휴전/고장 동작 비율 ····· 45
[그림 5-1] IED 로직 개선 예 ····· 51

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경 및 목적

소프트웨어 오류로 야기된 2003년 8월 발생한 미국 북동부 대정전(Northeast Blackout of 2003)은 뉴욕을 비롯한 미국 7개주와 캐나다 1개주를 암흑세계로 만들었고 피해주민 5,000만명, 100여명의 사망자를 내는 등 사회적으로 큰 피해를 유발했다[1].

한국의 경우도 변전소 GIS 절연파괴 고장으로 산업단지에 대규모 정전이 발생하여 약 3,000억원의 보상 요구가 뒤따르는 등 전력설비 고장은 사회적으로 큰 피해를 끼치므로 안정적인 전력계통 운영을 위해서는 장기사용으로 노후화된 설비의 적기 보수 및 교체가 중요하다.

고장 발생의 우려가 있는 국내 장기사용 전력설비는 계속 증가될 것으로 예상되며, 특히 전력계통을 구성하는 핵심설비 중 하나인 GIS는 현재 사용 중인 22년 사용 교체주기를 적용할 경우 2025년도에는 운전중인 154 kV 이상 GIS 수량의 약 55%가 교체 대상이 되어 막대한 재원[1)]이 필요할 것으로 예상된다[2].

---

1) 2022년도 한 해에 필요한 장기사용 GIS 교체 등에 소요되는 예산은 약 1,899억원임. ('22년 변전설비 보강사업 시행 알림, 한국전력공사)

그러나, 최근 우크라이나 전쟁 등으로 인한 전 세계적인 전력 연료비의 상승은 국내 전력회사 사상 최대의 적자 원인이 되었고, 어느 때 보다 전력설비 투자재원 확보의 어려움이 예상된다. 막대한 예산이 필요한 노후 GIS 교체의 경우, 합리적인 교체기준이 필요하나, 아직까지도 국내에서는 설비 운전기간에 따른 교체기준(TBM, Time Based Maintenance)을 주로 적용하여 주기가 도래한 설비에 대해서는 일괄적으로 설비 교체를 시행하는 실정이다.

이렇게 통계적 수명에 의하여 GIS 교체주기를 정하여 시행하는 것은, 아직 GIS 운전수명 결정의 중요 인자인 절연열화 고장의 패턴이 명확히 발견되지 않았고, 운전 대수 대비 분석을 위한 GIS의 고장률 자체가 너무 낮은 점, 또한 설계 개선으로 인한 지속적인 GIS 구조 변경 등 적용의 타당성을 부여하기 힘든 측면이 있다.

이에 국내 전력회사도 설비 상태를 반영한 GIS 수명 평가를 위해 현장 실증시험을 통한 Health Index 도출, GIS 상태를 실시간으로 분석, 판단하여 설비 투자계획을 수립하는 통합 플랫폼 구축 등을 추진 중이다.

그러나 문제는 전술한 시스템이 정착되고 안정화되기 전, 직면하고 있는 기존 노후 GIS의 교체 방안 수립이다. 설비 상태에 따른 교체 주기 산정을 위해서는 기존에 축적된 설비의 현장 운전 데이터가 중요하나,

GIS의 운전 데이터는 수명평가를 위한 분석, 통계처리에 적합한 형태로 저장되지 않았기에 활용의 제약이 있었다.

현재까지도 GIS 운전수명을 판단하는 핵심인자인 차단기 동작횟수가 전류 차단과 무부하 차단 등 동작 종류의 구분 없이, 주간 단위 동작 실적과 총 동작 누계만이 GIS에 설치된 기계식 카운터에 의지하여 기록되어져 오고 있는 실정인 것이다.

본 연구는 이러한 현장 데이터의 제약을 극복하기 위해, GIS 차단기의 주간 단위 동작횟수가 특정한 패턴을 가진다는 가설 하에, 운전 중인 GIS 동작 기록 분석을 통하여 용도별 GIS의 동작 패턴을 확인하였고, 이를 활용하여 활용성이 없어 사장될 위기에 있던 기존 GIS 운전 데이터만으로 전류 차단과 무부하 차단 등을 구분하는 알고리즘을 개발하였다. 또한 이를 바탕으로 현장 축적 데이터에 기반한 GIS 교체기준(안)을 제시하였다.

제 2 절 논문의 개요 및 구성

본 연구에서는 현장 취득 데이터에 근거한 GIS의 합리적 교체기준을 제안하기 위해 기존에 수행하였던 통계적 수명평가와 실증 시험 등을 통한 수명평가 방안 등을 검토하였고, GIS 운전수명에 영향을 미치는 핵심인자인 부하차단 데이터 기반 GIS 관리방안을 제시하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다.

제1장에서는 본 연구의 배경과 목적 그리고 논문의 개요, 구성에 대해 살펴보았다.

제2장에서는 국내에서 운전 중인 GIS 설치 현황과 고장 원인을 살펴보고, 수집한 고장 자료를 분석하였다.

제3장에서는 현재 적용 중인 GIS 교체 기준의 근거가 되는 통계적 분석에 대한 유사 연구 자료를 검토하였고, 이의 문제점을 제기하였다. 또한 통계적 분석의 대안으로서의 실증 시험 방안을 소개하고 최근 시행된 유의미한 실증 시험 결과를 검토하였다.

제4장에서는 합리적인 GIS 교체주기 산정을 위해서, 기존 축적 데이터 활용을 위한 GIS 동작 패턴을 분석하였고, 현장 데이터에 기반한

GIS 교체 기준(안)을 제시하였다.

제5장에서는 본 연구의 의미와 적용 분야 그리로 향후 추가 연구가 필요한 분야를 제시하였다.

제 2 장 GIS 고장원인과 통계

제 1 절 GIS 설치현황

GIS는 금속용기 내에 모선, 차단기, 단로기, 변성기 등을 설치하고 SF_6 가스를 충진하여 절연시키는 종합 개폐장치로 국내에는 국토의 효율적 이용[2)]과 우수한 신뢰성으로 인하여 1970년 말부터 도입되어 25.8 kV부터 800 kV 정격전압까지 국산화되어 사용되고 있는 전력계통 주력 개폐장치로 국내 전력회사가 '22년 7월 기준 전국에 36,688대를 운영 중이다[3].

[표 2-1] 전력계통 전압별 GIS 운전 현황('22년 7월 기준)

전 압	765 kV	345 kV	154 kV	23 kV	합 계
대 수	106	2,323	10,789	23,470	36,688

최근에는 온실가스 감축을 위해서, CO_2 대비 온난화 지수[3)]가 23,900배인, SF_6 가스 대신, GIS 절연매질로 25.8 kV급에는 건조건기(Dry Air)나 Epoxy 등의 고체 절연물을 적용 중이다.

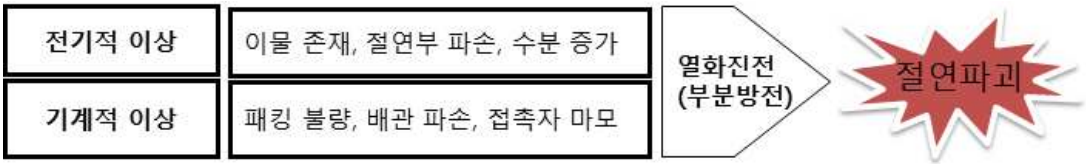
2) GIS의 경우 공기절연개폐장치(AIS) 대비 약 20% 이내의 설치 면적을 차지함

3) 온난화 지수(GWP, Global Warming Potential) : 온실 가스의 지구 온난화 영향을 나타낸 지수로 CO_2가 1이다.

또한, 송전선로용으로 사용되는 170 kV급에도 불소계 혼합가스를 사용하는 친환경개폐장치인 EGIS(Eco-GIS)를 적용하기 위해 개발을 마치고, 실증 시험 중이다.

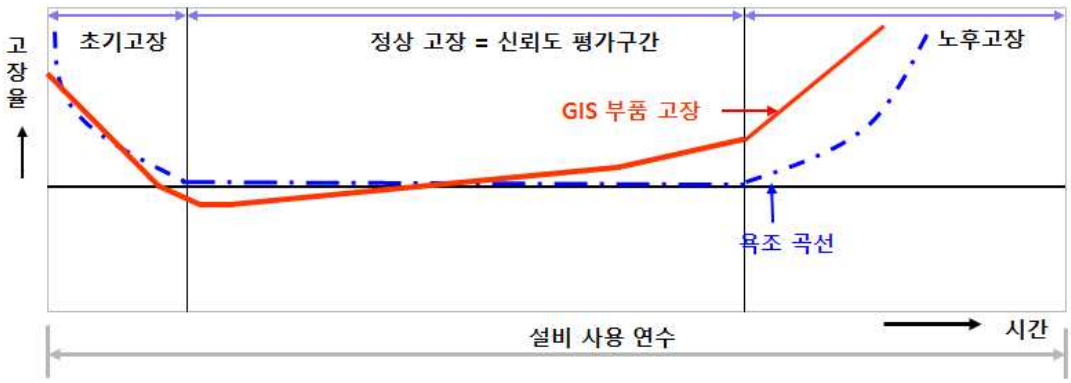
제 2 절 GIS 고장이론

GIS 고장원인은 전기적 이상과 기계적 이상으로 나눌 수 있으며, 이러한 전기적·기계적 스트레스가 장기화됨에 따라 절연열화가 진전되어 어느 순간 절연열화가 급진전 되어 사고가 발생하게 된다.



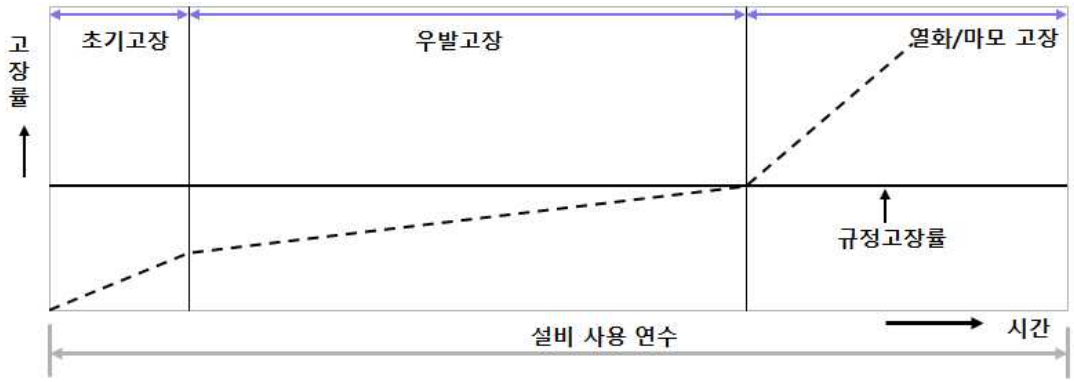
[그림 2-1] GIS 절연열화 진행과정

특히 중요 고장의 경우, 절연 스페이서와 같은 절연재료의 고장비율이 20% 정도로 타 고장 대비 상대적으로 높고 그 외의 고장도 결국엔 절연 파괴로 이어지는 경우가 대부분이다[4].



[그림 2-2] 사용 연수에 따른 GIS 부품 고장

사용연수에 따른 GIS 구성 부품의 고장 추이는 [그림 2-2]와 같이 전지전자제품의 신뢰도를 이야기할 때 사용되는 욕조곡선(Bath-tube curve)과 같은 형태를 보이며, 그래프에서 세로축은 고장률, 가로축은 시간이다. 주로 초기에는 제작 및 시공 결함에 의해 고장률이 높고, 이후 안정화 단계를 거쳐 수명 말기에 구성 부품의 노후화에 의한 고장으로 고장률이 높아진다[5].



[그림 2-3] 사용 연수에 따른 GIS 열화 고장

GIS 절연재료의 절연열화에 의한 고장 예상 추이는 [그림 2-3]과 같고, 이는 전술한 욕조곡선 그래프와 달리 초기에는 고장률이 낮고 설비 수명기간 동안 규정 고장률 이하에서 완만히 상승하다 설비 수명말기에 증가하는 추세를 보이며, 이는 절연열화 고장의 증가율이 GIS의 수명과 밀접한 관계가 있는 것을 나타낸다.

제 3 절 GIS 고장통계 분석

GIS 고장통계 분석을 위하여 국내 전력회사의 2016년도부터 2021년도까지[4]의 최근 5개년 동안 발표된 연도별 변전설비 고장통계 자료를 수집하여 활용하였다. 자료 분석 시, 인적 실수에 의한 고장은 제외하였다[6].

[표 2-2] 최근 5개년 GIS 고장원인

구 분	제작 불량	계전기 오동작	자연 열화	외물 접촉	파급 고장	합 계
건 수	30	-	24	1	21	76
점유율	39%	-	32%	1%	28%	100%

최근 5년 동안 인적실수를 제외한 GIS 고장은 총 76건이 발생하였으며, 초기 고장인 제작 불량이 39%로 점유율이 제일 높았으며 자연열화가 32%로 나타났다.

제작 불량과 자연열화 고장의 연도별 고장추이는 [표 2-3]과 같으며, 자연열화 고장 비율이 점차 증가하고 있는 것으로 나타났다. 특히 '19년도부터는 고장원인 중 자연열화의 점유율이 제일 높았으며, 자연열화 고장의 주요원인으로는 GIS 스페이서, 고체절연물 등 절연물의 절연파괴에 의한 고장의 점유율이 높게 나타났다.

4) 2020년도는 고장통계 자료 미발표로 제외함

[표 2-3] GIS 제작불량/자연열화 고장 추이

구 분	'16년도	'17년도	'18년도	'19년도	'21년도
제작불량(건)	8	8	5	4	5
자연열화(건)	-	-	2	7	15

국내 전력회사의 GIS 고장통계 분석을 시행하였으나, 최근 5년간 연도별 평균 GIS의 고장건수는 15.2건으로 운영 중인 전체 GIS 대비 약 0.04%에 불과해 국내 제작사 GIS 고장 자료를 추가로 조사하였으나 국내 제작사로부터는 수명에 관계된 설비운영 데이터 보다는 주로 초기 고장에 관계된 제작 결함 데이터 수집만이 가능하였다.

국내보다 상대적으로 오랜 기간 동안의 GIS 설치, 운영 역사를 가진 독일의 경우, 1971년도부터 2011년도까지 40년 동안 운전한 123 kV GIS 2,350 Bay[5]에 대한 GIS 고장통계를 보더라도, 품질이 안정화 되지 않았던 초기 고장률은 상대적으로 높았으나 이후, 고장이 줄어드는 패턴을 보이고 있어, 열화에 의한 수명특성이 나타나지 않았다[7],

해외 제작사로부터도 설치 후 40년 동안의 운전 데이터에서 GIS 수명에 관계된 욕조곡선(Bath-tube curve)의 말기에 해당하는 열화고장

5) Bay : 차단기와 단로기 등을 포함한 GIS의 1회로 단위

데이터를 얻을 순 없었다. 오히려 경험적으로 초기고장 구간을 제외하곤 절연열화에 의한 고장 패턴이 아직 명확하게 나타나지 않아 GIS 수명을 40년 이상으로 예상하는 자료만 구할 수 있었다[8].

종합하면, GIS의 운전수명의 중요 인자인 절연열화 고장의 패턴은 아직 명확히 발견되지 않았고, 운전 대수 대비 GIS의 고장률 자체가 너무 낮아 열화고장에 의한 통계적 분석에 따른 교체주기 산정이 큰 의미를 갖기 힘들다는 것이다. 즉 아직까지는 GIS의 교체주기를 통계적인 방법으로는 정확히 알 수 없다는 것이다.

이는 현재 근거가 불명확한 통계적 수명에 의하여 GIS 교체주기를 22년으로 정하여 시행하는 것에 타당성을 부여하기 곤란한 점과 일맥상통 한다. [그림 2-4]는 전술한 내용을 종합한다.

[그림 2-4] 절연열화에 따른 GIS 기대수명

제 3 장 기존 GIS 건전성 평가방법

제 1 절 GIS 교체기준

기존 노후 GIS 교체 프로세스는, 사용 연수 22년 이상인 설비 중 노후화 정도가 심한 설비부터 가용 예산 등을 고려하여 우선 순위를 정하여 교체 대상을 선정하고 있다.

(기존 프로세스) 사용 연수 (22년 이상) → 전문가 판단 → 투자계획 수립, 교체

[그림 3-1] 기존 GIS 교체 프로세스

통계 수명인 사용 연수 외에 적용 중인 GIS 건전성 평가 요소를 정리하면, [표 3-1]과 같다[9][10].

[표 3-1] GIS 설비 신뢰도 평가항목

평가 항목	내 용
① 고장전류차단	▪ 규정개폐 횟수 [20회 기준] 고장전류 연속 차단 시 설비 이상 증가
② 차단기 동작횟수	▪ 규정개폐 횟수 [2,000회 기준] 부하전류 차단 등 다빈도 동작시 설비 이상 증가
③ 중고장 보수이력	▪ GIS 부품 등 일부 교체
④ 경고장 보수이력	▪ 경고장(누유, 발청 등)으로 인한 보수
⑤ 조작방식	▪ 154 kV 공압, 23 kV 스프링 방식 지연차단으로 인한 고장확대 우려

기존 GIS 교체 프로세스의 문제점은, 전문가의 설비 노후화 정도 판단을 위한 현장 데이터 제공이 부족하다는 것이다. 이는 기존의 설비 데이터가 비표준된 형태로 각각의 시스템에 분산된 형태로 축적[6]되어 있거나 유지보수 데이터는 HWP, PDF 등의 형태로 관리되어 전문가의 활용이 어렵기 때문이다. 이러한 데이터 활용의 제약 조건으로 인하여, 설비 전문가는 주로 사용 연수가 오래된 순서로 교체 순위를 정하고 있는 실정이다.

이러한 문제는, 2021년 6월 운영을 시작한, 변전 예방진단시스템(SEDA, Substation Equipment Diagnostic & Analysis system) 기반 통합 플랫폼[7]이 안정화되고, 활용 가능한 표준 데이터가 축적되어진다면 개선될 것으로 예상되나, 문제는 체계적으로 축적되지 못한 과거 데이터의 활용 방안이다.

(개선 프로세스) 센서 진단, Big Data 분석 → AI 상태판정 → 투자계획 수립, 교체

[그림 3-2] 개선 GIS 교체 프로세스

6) GIS 설비/운전 데이터는 성격에 따라 변전소 운전실적 관리시스템, ERP, 정전고장시스템 등에 별도로 관리되고 있어 데이터 활용을 위한 데이터 표준화 및 연계가 진행되고 있다.

7) 설비 상태를 실시간 분석, 판단하고 Big Data 분석을 통하여 설비 투자계획을 수립하기 위한 통합 플랫폼

현재까지도, GIS 운전수명을 판단하는 핵심인자인 차단기 동작횟수와 고장전류 차단횟수[8] 데이터가 구분되어 축적되어지지 않았고, 주간 단위 동작 실적과 총 동작 누계만이 GIS 내부에 설치된 기계식 카운터에 의지하여 기록되어지고 있는 실정이다.

[그림 3-3] 기계식 GIS 동작횟수 카운터

8) 차단기 운전수명 판단, 정밀점검 시기를 결정할 때 차단기 동작횟수 2,000회, 고장전류 차단횟수 20회를 기준으로 함.

제 2 절 유사 연구자료 검토

1. 통계적 분석의 한계

제2장 제3절 ‘GIS 고장통계 분석’에서 전력계통에서 사용되는 전압계급 23 kV 이상의 GIS의 경우, 운영 대수 대비 고장 건수가 미미하여 통계적 분석을 통한 교체주기 산정은 큰 의미가 없음을 기술하였다.

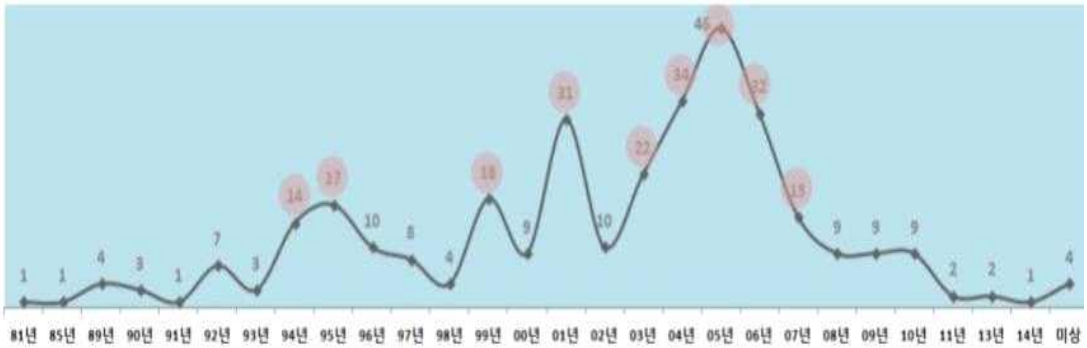
전술한 사례 이외에도, 국내외 전력계통에 사용되는 GIS의 고장통계를 활용하여 유의미한 통계적 의미를 얻기 위한 시도는 있었으나 역시 데이터의 불충분으로 유미한 결과는 얻을 수 없었다. 참고한 주요 연구와 연구 내용은 [표 3-2]와 같다.

[표 3-2] 관련 주요 연구 사례

저자	제 목	내 용
이강수 (2008)	고장 Life Cycle을 고려한 Phase별 관리방안 검토	변전설비 초기/우발/노후 고장에 따른 설비관리 프로세스 개선
이강수 (2011)	건전도 평가기반의 차별화된 변전설비 관리체계 도입	변압기/개폐장치 건전성에 영향을 미치는 핵심인자 선정, 건전도 평가 알고리즘 제시
Karsten Pohlink (2012)	Residual Life Concepts Applied To HIV GIS	경험상 GIS 수명은 45년 이상으로 보여지나, 설계 변경 등으로 향후 정확한 수명은 알 수 없음 (CIGRE Technical Brochure 499)
이병성 (2013)	배전선로 감시·제어용 디지털 장치의 신뢰도 향상 연구	운영환경을 반영한 배전 디지털장치 수명평가체계 및 수명연장 방안
한기선 (2014)	FMECA를 이용한 가스절연개폐장치 고장분석 및 치명도 평가[11]	1981년부터 2008년까지의 고장데이터를 활용 FMECA 방법을 통하여 신뢰성을 분석
엄주현 (2015)	가공개폐기 잠정 교체기준 및 향후계획[12]	개폐기 138,749대에 대한 고장 데이터 분석으로 평균수명 산출, Health Index 선정 및 현장적용
김정태 (2017)	해외 전력설비 데이터를 이용한 GIS 수명특성 분석	영국, 독일의 고장데이터를 활용하여 통계적 수명특성을 분석
권동진 (2017)	전력용 변압기/GIS 자산관리를 위한 DB 조사 및 분석 연구	국내외 자료조사를 통한 자산관리 시스템에 필요한 데이터의 선정과 장기 저장방안 제시
조진성 (2019)	변전설비 실증시험장 구축 및 시험 기술 개발[13]	통계적 수명예측의 대안으로 GIS 실증시험방안 제시
권순재 (2021)	변전설비 자산성능평가 적용기준	설비운영 데이터기반 설비 리스크 평가에 따라 설비 투자 최적화
김태훈 (2021)	154 kV 친환경 개폐장치 가속열화 시험 추진	친환경 개폐장치 실부하 차단시험을 통한 신뢰성 검증 방안

관련 연구 자료 중, GIS 대비 상대적으로 많은 운영 대수와 유의미한 고장 데이터를 보유한 배전용 가공개폐기 신뢰도 분석 자료[12]를 검토하고, 연구 결과의 현장 적용 결과에 대해 전문가 회의를 시행하였다.

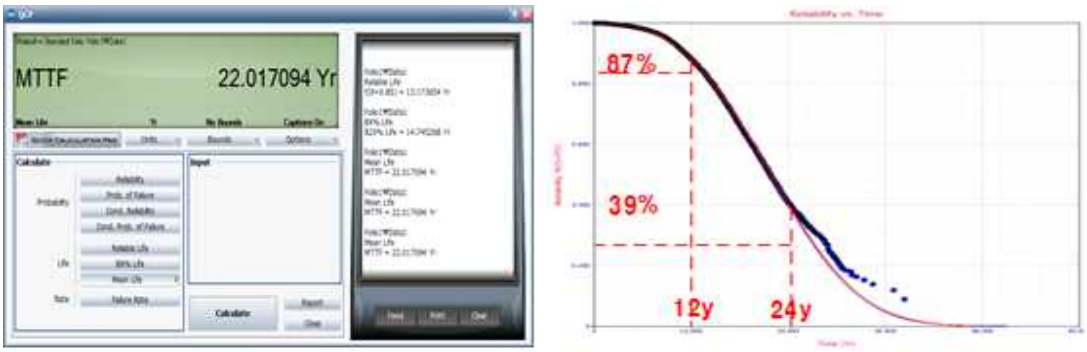
배전선로 가공개폐기 신뢰도 분석을 위하여 1981년부터 2014년까지 33년간 제작사별 고장통계를 분석하여 평균 고장 발생 시간(MTTF)[9] 22.01년을 산출하였고, 이 기간은 욕조 곡선[그림 2-4]의 평탄구간(정상고장 구간)에 해당한다.



[그림 3-4] 연도별 가공개폐기 고장현황[12, pp. 6] [10]

9) MTTF(Mean Time To Failure) : 대상기기가 첫 번째 고장을 일으킬 때까지 걸리는 평균 시간

10), 11) 저자 엄주현의 허락을 받고 관련 연구자료 그래프 인용



[그림 3-5] 가공개폐기 MTTF와 신뢰도[12, pp.25][11)]

[그림 3-5]의 가공개폐기 MTTF와 신뢰도 사이의 관계는 다음 관계식에 의해 구할 수 있다.

$$R(MTTF) = R(\frac{1}{\lambda}) = e^{-1} \simeq 0.36 \qquad (3.1)$$

이는 가공개폐기 MTTF에서의 신뢰도는 40% 미만이며, 가공 개폐기의 교체주기(수명) 이내의 기간이라도 주기적인 기기 점검을 통하여 이러한 불신뢰도를 극복해야 한다는 것을 의미한다.

본 연구는, 결과물인 가공 개폐기 MTTF를 기반으로 교체기준을 제정하여 2015년도에 현장 적용하였는데, 이의 현장 적용 효과를 검증하기 위해 교체기준 적용 전후 2년간, 최근 2년간의 가공개폐기 고장 건수를 추출하여 비교해 보았다.

[표 3-3] 연도별 가공개폐기 고장현황[12)]

구 분	기준 적용 전		기준 적용 후		최근 2년	
	'13년도	'14년도	'16년도	'17년도	'20년도	'21년도
일시고장(건)	69	50	37	43	77	104
순간고장(건)	77	79	79	87	216	224
합 계	**146**	**129**	**116**	**130**	**293**	**328**

[표 3-3]에서 보이는 것처럼, 교체기준 적용 후에도 고장률 감소는 관찰되지 않았다. 연구 결과에 따른 통계적 분석에 의한 교체수명을 적용하였는데도 고장률이 감소하지 않은 이유에 대한 전문가 회의 결과는 다음과 같다.

① 신규 가공 개폐기 제작사의 시장 진입

② SF_6 가스 절연 개폐기에서 고체절연 개폐기로의 사양 변화로 제작사별 개폐기의 수명 변화

③ 운전 수명을 결정짓는 핵심인자인 개폐기 투입/개방 횟수의 Health Index 미반영

신규 제작사의 시장 진입 및 설계/제작 사양의 변화는 배전 개폐기뿐만 아니라 GIS 시장에서도 이루어지고 있는 현상이고, 차단횟수는 GIS 교체주기 판정에서도 핵심인자 중 하나이다.

12) 연도별 '배전설비 정전분석 및 예방대책(한국전력공사)'의 자료를 재구성함

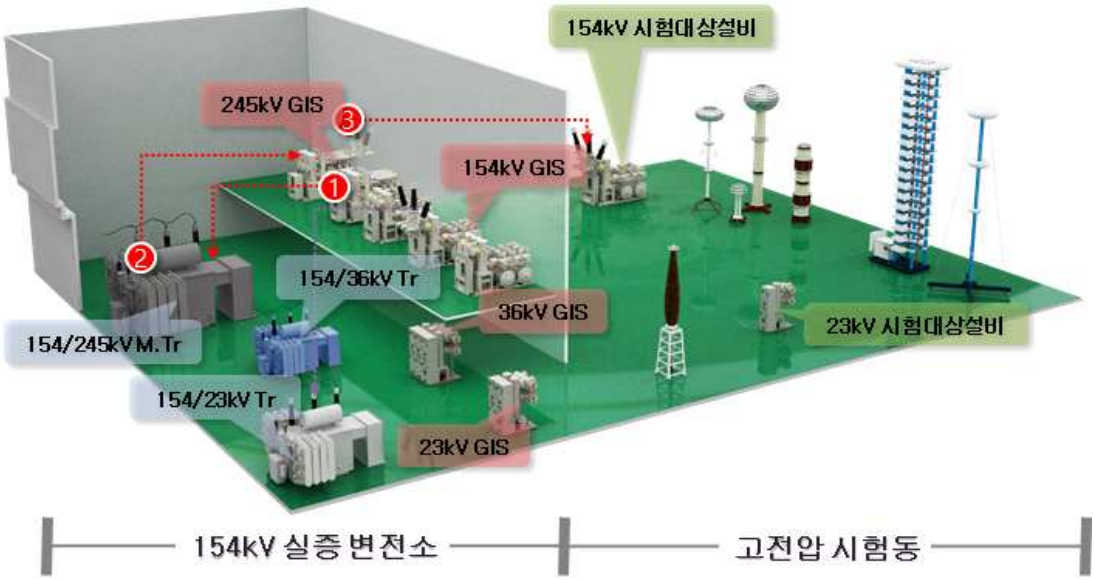
기존 연구 자료를 종합해 보면, GIS는 고장 데이터의 부족으로 통계적 분석이 큰 의미를 가지지 못하며, 배전 가공 개폐기와 같이 고장 데이터가 확보되었다 하더라도 신규 제작사 시장 진입, 설비 사양 변경 등으로 인하여 과거 고장 데이터에 근거한 통계적 수명의 현장 적용이 한계가 있을 수밖에 없음을 나타내는 것이다.

이는 기존의 통계 수명 적용 방식(TBM)을 대신하는, 설비 자체의 상태에 근거한 교체판정(CBM, Condition Based Maintenance)의 필요성을 나타낸다.

2. 통계적 분석의 대안인 실증 시험

기존 통계적 분석에 의한 GIS 교체주기 적용의 한계를 극복하기 위하여, 국내 전력회사에서는 계통에서 운영되고 있는 실제 변전소와 동일한 형태와 규모의 변전설비 실증 시험장을 구축하였다[13].

변전 실증시험장은 [그림 3-6]과 같이 실증 변전소동과 고전압 시험동으로 구성되어 있으며, 154 kV와 23 kV급 변전설비의 장기 신뢰성 시험을 수행할 수 있도록 설계되었다.



[그림 3-6] 변전실증시험장 구성[13)]

13) 조진성, 한기선, 박민혜 “변전설비 실증시험장 구축 및 시험 기술 개발 (2019)”에서 인용함

실증 변전소동은 운영 중인 154 kV 변전소와 동일한 형태로, 실증 변전소에서 고전압 시험동의 피시품에 1.0 P.U.에서 1.6 P.U.까지의 전압을 인가할 수 있으며, 154 kV 설비 시험을 위한 전압인가 경로는 다음과 같다.[그림 3-6의 ①~③의 적색 경로][14)]

① 연결 전력계통에서 154 kV GIS로 수전

② 154 kV / 245 kV 승압 변압기로 1.0 P.U .~ 1.6 P.U.까지 전압 조정

③ 245 kV GIS로 송전하여 Wall Bushing을 통하여 피시품에 전압 인가

현재 국내 전력계통에서 사용하지 않는 245 kV를 사용하여 피시품에 과전압을 인가하는 이유는 세계적으로 통용되고 있는 과전압에 의한 GIS 절연 부품 등의 수명 평가를 위해서 이며 관련 자료는 [표 3-4]와 같다.

---

14) 23 kV GIS는 23 kV / 36 kV 승압 변압기를 통하여 최대 1.6 P.U.의 시험 전압을 인가 할 수 있음

[표 3-4] 과전압에 의한 수명 평가 문헌

관련 문헌	내 용
IEC 60505 Evaluation and Qualification of Electrical Insulation Systems	열화는 전기·열·기계·환경 인자가 단일 또는 조합으로 발생하며, 전기적 열화에 의한 **가속수명시험은 과전압으로 실시함**
IEC 61251 Electrical Insulating Materials - A.C. Voltage Endurance Evaluation	가속수명시험을 위한 **전압과 수명과의 관계를 나타내는 역승모델(Inverse-power model) 제시**
CIGRE 360 Insulation Coordination Related to Internal Insulation of GIS	전압 열화계수, 신뢰수준에 따라 절연물의 장기 **전압-수명 곡선**을 제시함
CIGRE 15-301 Long-Term Performance of SF6 Insulated Systems	**전압 스트레스 크기**에 따른 **스페이서, 지지 애자 등의 고장발생 가능성 및 수명곡선** 제시

전술한 과전압에 의한 신뢰성 시험은 기존의 내전압 시험기로도 단상 시험은 가능하나, GIS는 3상 일괄형으로 변전 실증시험장을 통한 3상 동시 시험으로 실제 사용 조건과 동일한 스트레스를 인가할 수 있을 뿐만 아니라, 실 계통에서 운전 중 발생할 수 있는 여러 과도현상도 시험할 수 있는 장점이 있다.

변전설비 실증시험장 준공으로, 향후에 개발되는 신규격의 변압기, GIS 등의 변전기기는 장기 신뢰성 시험을 통하여 교체 연수와 Health Index를 도출할 수 있게 되었다.

또한, 향후 변전 실증 시험장에서 다양한 실증 시험을 통하여 축적되는 여러 데이터는 기존에 문제되었던 GIS 운전 데이터의 한계를 극복하고 Big Data를 축적하여 활용하는 데에도 기여할 것이다.

하지만 여전히 기존에 운전되고 있는 GIS의 교체주기는 어떻게 합리적으로 산정할 수 있느냐의 문제는 그레이 존(Gray Zone)으로 남아있다.

제 3 절 실증 시험 사례 검토

제2장 제1절에서 GIS의 온실가스 감축을 위해서 23 kV GIS는 절연매질로 기존의 SF_6 가스 대신 건조건기(Dry Air)나 고체절연물을 적용 중이며, 불소계 혼합가스[15]를 적용한 170 kV 친환경 개폐장치를 개발하였다고 소개한 바 있다.

친환경 절연가스인 불소계 혼합가스의 성분 및 조성비는 [표 3-5]와 같고, 이 새로운 절연매질에서는 운전 중 CO 가스[16] 발생이 절연열화 판단의 지표물질이다[14].

[표 3-5] 불소계 혼합가스 종류 및 조성비

구분	C_4F_7N + CO_2 + O_2	C_4F_7N + CO_2
조성비	C_4F_7N : 3.8%, CO_2 : 76.2%, O_2 : 20%	C_4F_7N : 5%, CO_2 : 95%

GIS의 새로운 절연매질로서의 불소계 혼합가스의 안정성을 실증하기 위해, [표 3-6]과 같이 실제 운영 중인 변전소에 설치하여 실증 기간을 거쳤다.

15) SF_6와 동등한 절연 내력을 가지면서, 지구온난화 지수는 SF_6 대비 10% 수준

16) CO, CO_2는 SF_6 절연기기에서도 절연재료의 경년열화에 의해 생성되는 가스로 수명 판단의 근거가 된다[15].

[표 3-6] 170 kV EGIS 실증 결과

실증 기기	실증 기간	실증 결과
362 kV EGIB[17]	**1년 (4계절 포함)**	가스 조성비 변화, CO 발생 없음 → **전압, 기온변화에 의한 열화 없음**
170 kV GIS	9개월(동절기 포함)	가스 조성비 변화 없음 → **GIS 동작시 CO 발생**

이 실증 결과는, 새로운 절연매질에서 절연열화의 주요 원인은 GIS의 동작이며, 실증기간의 영향은 상대적으로 미미하다는 것을 나타낸다.

이를 바탕으로 국내 전력회사는 새로 개발된 170 kV EGIS의 현장 적용 전에 제3장 제2절에서 설명한 변전설비 실증시험장에서 차단기 수명에 가장 큰 영향을 주는 요소인 동작 횟수 중심의 가속 열화시험을 진행 중이다[16].

가속 열화시험은 170 kV GIS 사용기간(22년) 동안의 평균 부하차단 횟수만큼 실부하 개폐시험을 시행한 후, 절연내력을 유지하는지, 가스 누기는 없는지 등을 확인하는 형태이다. 실증을 위한 GIS 수명기간 동안의 평균 부하 차단 횟수를 구하기 위해서 식 (3.2)를 적용하였으나,

[평균 총 동작 횟수 − 점검 시 차단기 동작 횟수(무부하 차단)] (3.2)

17) GIB (Gas Insulated BUS) : 개폐장치가 설치되지 않은 가스절연모선

변전소 운전실적관리시스템[18]에서 부하와 무부하 차단을 구분하여 저장하고 있지 않아, 무부하 차단 횟수를 가정한 값을 사용할 수 밖에 없었다.

[표 3-7] 170 kV GIS 부하 차단횟수 산정

평균 동작횟수(a)	점검 시 차단기 동작횟수(b)	평균 부하 차단횟수 (a-b)
시스템 추출	사용기간 22년 동안 점검 횟수 고려한 **가정치**	
223.1회	118.7회	**104.4회**

이 사례를 유의미한 실증 사례로 소개한 이유는, 기존 SF_6 사용 GIS와 마찬가지로 신규 170 kV EGIS도 운전 수명 결정의 핵심인자로 GIS 동작 횟수를 적용한다는 것을 의미하기 때문이고, 또한 향후 더 정확한 실증을 위해서도 데이터 축적 단계부터 부하 차단과 무부하 차단을 구분할 필요성을 나타내기 때문이다.

18) 변전소 운전실적관리시스템 (Substation Operating results MAnagement System, SOMAS) : 전국 변전소 주변압기, 송전선로, 배전선로 등의 부하현황 및 차단기 상태 정보를 SCADA로부터 취득하여, 송변전설비 운영 및 계획업무에 필요한 운전실적 정보를 제공하기 위한 시스템

제 4 장 부하차단 데이터 기반 GIS 관리방안

제 1 절 기존 GIS 데이터 활용 필요성

제3장에서 통계적 분석에 의한 일괄적인 GIS 교체 주기 적용의 문제점과 이의 대안으로 신규격, 신기술 적용 GIS의 교체 연수와 Health Index 산정을 위한 실증시험 방안에 대해 논의 하였다.

향후 새롭게 개발되는 GIS는 실증시험을 통해 보다 현실적인 교체 연수를 도출할 수 있을 것이고, GIS 상태를 실시간으로 분석, 판단하여 설비 투자계획을 수립하는 통합 플랫폼이 적용되기 시작한다면 기존에 설치되어 있는 GIS의 교체 연수 문제도 해결될 것이다.

하지만, 그러한 통합 플랫폼이 적용되어 안정화되기 전까지 몇 년이 걸릴지는 아직 확신하기 어렵다. 실시간으로 설비 정보를 전송하기 위한 각종 센서를 운영 중인 전 변전소에 설치하는 것도 예산과 시간의 문제이기 때문이다[19].

19) 운영 중인 전 변전소에 적용하려면 2027년 이후 완료될 것으로 예상

그렇다면, ① 막대한 재원이 투입[20]되는 노후 GIS 교체는 앞으로도 수 년 동안은 기존의 관행대로 진행되어야 하는가. 또한, ② 기존에 20년 이상 축적되어진 설비 운전 데이터는 활용되어지지 못하고 사장되어야만 하는가.

이러한 이유에서 기존에 축적되어진 GIS 데이터를 최대한 활용할 수 있는 방법을 모색하여 보다 합리적인 GIS 교체 판정을 위한 레퍼런스를 제공할 필요가 있는 것이다.

20) 170 kV GIS 1 Bay 설치 비용은 약 3.3 억원으로, 2025년도 교체대상은 4,122 Bay

제 2 절 GIS 동작분석 알고리즘

본 절에서는 기존 GIS 운전 데이터 활용방안으로, 운전 수명 결정의 핵심인자인 GIS 차단기 동작횟수, 즉 전류 차단 실적에 따른 교체 우선 순위(안)을 제시하려고 한다.

현재 GIS 수명평가에 적용 중인 고장 전류 차단횟수는 수명기간 동안 20회, 부하전류 차단횟수는 2,000회이다[21].

그러나, 문제는 기존 축적 데이터는 고장/부하/무부하 차단의 구분 없이 기계식 차단기 카운터[22]에 표시된 누적 동작횟수만 주기적인 설비 순시에 의해서 관리되고 있다는 것이다.

이러한 기존 데이터를 활용하기 위해서, GIS 차단기의 주간 단위 동작횟수가 특정한 패턴을 가진다는 가설 하에, 이 동작 패턴분석을 통하여 전류 차단과 무부하 차단 등을 판별할 수 있는 차단기 동작구분 알고리즘 개발을 시작하였다. 개발순서는 [그림 4-1]과 같고 개발언어로는 Python을 사용하였다.

---

21) [표 3-1 GIS 설비 신뢰도 평가항목] 참고

22) [그림 3-3 기계식 GIS 동작횟수 카운터] 참고

- **1 단계 : 차단기 동작 Data 수집, 분석**
  시스템에 혼재된 차단기 동작 데이터 수집 및 분석

- **2 단계 : 차단기 동작 패턴 분석**
  특정기간 차단기 동작횟수 패턴 분석 → 부하/고장전류/단순 시험으로 구분

- **3 단계 : 차단기 동작구분 알고리즘 개발**

[그림 4-1] 차단기 동작구분 알고리즘 개발 순서

1. 데이터 수집, 동작 패턴 확인

현재 국내 전력회사의 GIS 관련 데이터는 8개의 시스템에 각각 별도의 목적을 위해 분산되어 저장되고 있다. 이중에서 필요한 4개의 시스템에서 데이터를 확보하였다. 관련 시스템 및 확보한 데이터는 [표 4-1]과 같다.

[표 4-1] 데이터 취득 내용

데이터명	취득 데이터	시스템명	데이터 규모
순시점검 보고서	차단기 명칭, 변전소 코드, 순시점검 일자별 차단기 동작 횟수(7년 누적)	변전소 순시점검 시스템	50만건 (300MB)
휴전승인서	설비 휴전 내역	휴전관리 시스템	20만건 (110MB)
계통보호 설비 동작	보호계전기 동작 기록	i-PAS[23]	5만건 (40MB)
설비 기본 정보	변전소 위치정보, 설비 제작 연도, 제작사, 사용 용도 등	설비운영 시스템 (ERP)	26만건 (100MB)

가용 데이터인 GIS 차단기의 ① 총 동작횟수, ② 주별 동작 누계만을 활용하여 고장/부하/무부하 차단을 구분할 수 있는 동작 패턴이 있음을 확인하기 위해, 순시점검보고서에서 운전 7년 이상 된 GIS 중 용도별[24] 대표성을 지닌 GIS 92개의 주간 단위 동작 데이터를 추출하고, 이 주간 단위 데이터와 매칭되는 차단기 동작 원인(휴전, 고장 등)을 휴전관리시스템과 고장정보 보유 시스템인 i-PAS에서 찾아 GIS 동작 패턴을 확인하였다.

23) i-PAS (Integrated Protection Assistance System) : 보호설비현황, 정정이력, 보호설비 동작현황, 자동 통계산출, 임피던스 계산 등 계통보호업무 전반에 대한 업무 지원시스템

24) 가공 송전선로, 지중 송전선로, 변압기, BUS SEC / TIE, 고객선로로 구분

[표 4-2] 가공 송전선로 GIS 동작 패턴 (2014년 제작, 총263번 동작)

동작 일자	동작 누계	동작 횟수	패턴 분석
20200827	236	2	고장전류 차단(재폐로[25)])
20190925	233	14	무부하 차단 (차단기 점검)
20171120	202	1	부하 차단(휴전 작업)

[표 4-3] M.Tr GIS 동작 패턴 (2015년 제작, 총224번 동작)

동작 일자	동작 누계	동작 횟수	패턴 분석
20210614	217	1	부하 차단(휴전 작업)
20210323	216	9	무부하 차단 (차단기 점검)
20201124	206	1	고장전류 차단

[표. 4-2]는 가공 송전선로 GIS의 동작 패턴으로 고장/부하/무부하 차단 시 주간 동작횟수가 특정 패턴을 가짐을 확인할 수 있었다.

[표. 4-3]은 변전소 변압기 GIS의 동작 패턴으로 고장/부하 차단과 무부하 차단간의 패턴 차이를 확인 가능했으나 변압기 GIS 차단기는 재폐로를 적용하지 않아 고장 차단과 부하 차단간의 차이를 나타내지는 않았다.

25) 재폐로 : 송전선로 고장 시 송전선 고장의 자동복구로 계통의 안정도를 향상시킬 목적으로 차단기가 차단되어 고장이 소멸된 후 자동적으로 차단기를 투입하는 일련의 동작[17]

차단기의 용도에 따라 차이는 있지만, 차단 종류별 동작횟수에 특정 패턴 존재의 가능성을 확인할 수 있었고, 선정된 92개 GIS에 대한 데이터 전처리를 진행하였다.

2. 데이터 전처리

추출된 데이터에 대해 7년의 동일 점검 기간(2014. 4. 1 ~ 2021. 7.11)을 설정하고, 이를 주 단위(378주)로 리샘플링 하였다[그림. 4-2]. 또한 다음과 같은 GIS 차단기 동작 특성 Column을 추가하였다[그림. 4-3].

- GIS 사용기간 = [점검일자] - [제작연월]
- GIS 용도 : 가공 송전선로, 지중 송전선로, 변압기, BUS/SEC, 고객

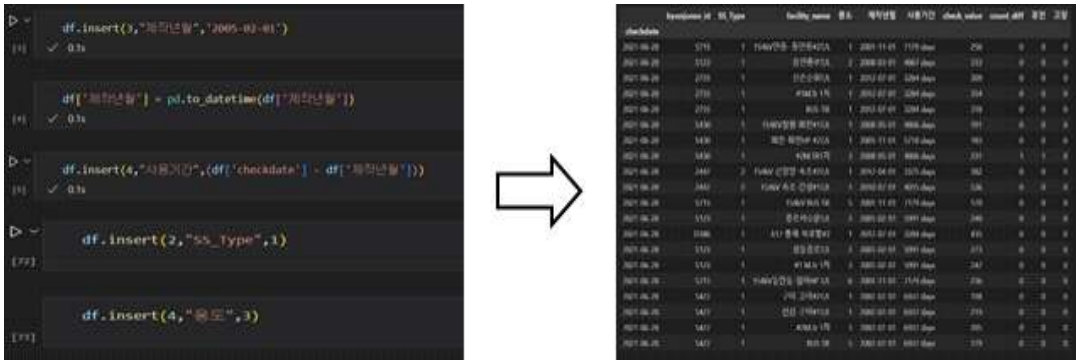
	byunjunso_id	facility_name	detail_name	check_value	checkdate
0	2447	#4M.Tr 1차	차단기 동작 횟수	473	20210928133757
1	2447	#4M.Tr 1차	차단기 동작 횟수	473	20210914115448
2	2447	#4M.Tr 1차	차단기 동작 횟수	473	20210907152842
3	2447	#4M.Tr 1차	차단기 동작 횟수	473	20210824103036
4	2447	#4M.Tr 1차	차단기 동작 횟수	473	20210818143532
...	...	...	...	...	...
426	2447	#4M.Tr 1차	차단기 동작 횟수	413	20130515145146
427	2447	#4M.Tr 1차	차단기 동작 횟수	413	20130503102033
428	2447	#4M.Tr 1차	차단기 동작 횟수	413	20130426102742
429	2447	#4M.Tr 1차	차단기 동작 횟수	413	20130417141340
430	2447	#4M.Tr 1차	차단기 동작 횟수	413	20130410161408

431 rows × 5 columns

checkdate	byunjunso_id	facility_name	check_value	count_diff	휴전	고장
2021-06-28	2447	#4M.Tr 1차	473	0.0	0	0
2021-06-21	2447	#4M.Tr 1차	473	0.0	0	0
2021-06-14	2447	#4M.Tr 1차	473	1.0	0	0
2021-06-07	2447	#4M.Tr 1차	472	0.0	0	0
2021-05-31	2447	#4M.Tr 1차	472	0.0	0	0
...	...	...	...	...	...	...
2014-05-05	2447	#4M.Tr 1차	428	0.0	0	0
2014-04-28	2447	#4M.Tr 1차	428	0.0	0	0
2014-04-21	2447	#4M.Tr 1차	428	0.0	0	0
2014-04-14	2447	#4M.Tr 1차	428	0.0	0	0
2014-04-07	2447	#4M.Tr 1차	428	0.0	0	0

378 rows × 6 columns

[그림 4-2] 추출 데이터→ 리샘플링 (주간)



[그림 4-3] GIS 사용기간, 용도 추가

3. GIS 동작 패턴 분석

용도별 GIS 차단기의 사용기간 대비 누적 동작횟수의 패턴을 [그림. 4-4]와 같이 분석해 보았다. 그림에서 X축은 사용 연수, Y축은 동작 횟수이다.

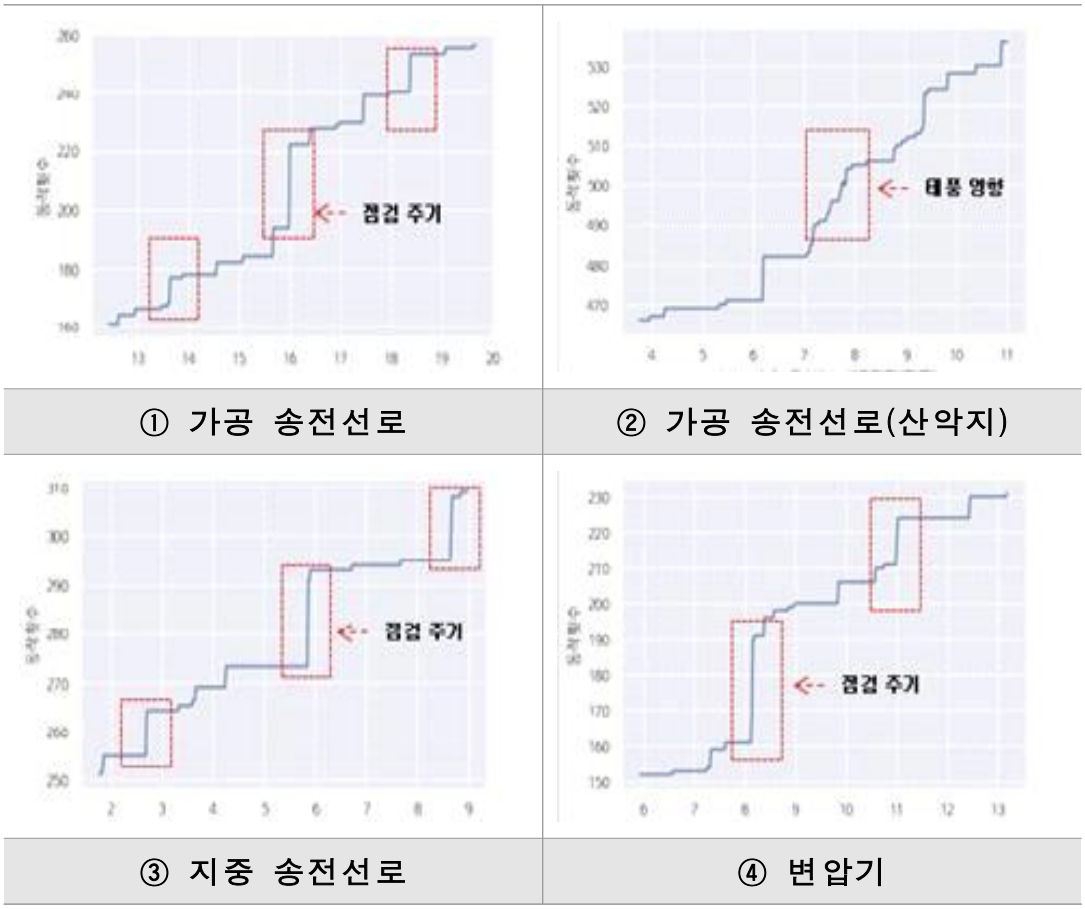
용도별 동작 패턴 특징은 다음과 같다.

① 가공 송전선로 : 3년 마다 동작 횟수 증가로 점검 주기성 확인

② 가공 송전선로(산악지) : 태풍, 낙뢰의 영향으로 인한 증가 패턴

③ 지중 송전선로 : 점검 주기성 확인, 가공 대비 동작 횟수 변동폭 작음

④ 변압기 : 점검 주기성 확인, 가공 대비 동작 횟수 변동폭 작음

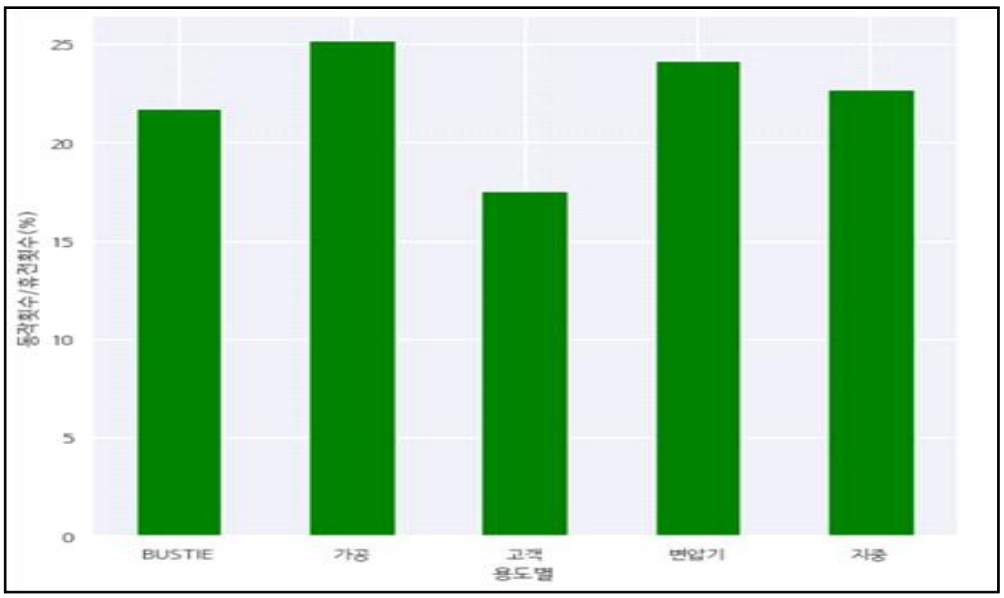


① 가공 송전선로	② 가공 송전선로(산악지)
③ 지중 송전선로	④ 변압기

[그림 4-4] 용도별 GIS 패턴(사용기간 대비)

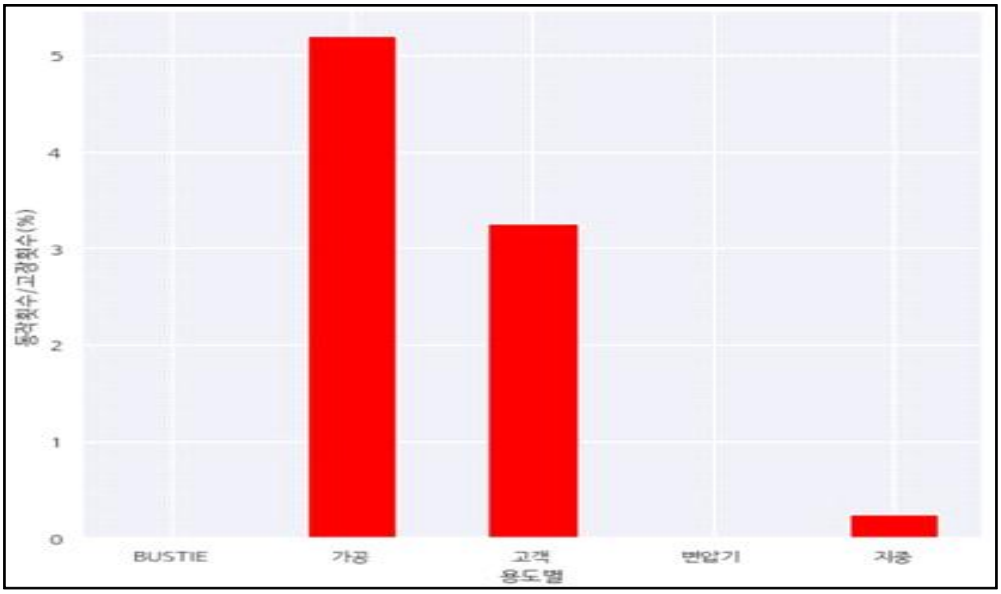
종합하면, 사용기간에 따른 GIS 차단기 동작횟수 분석으로 설비 점검 시기 도래에 따른 동작 횟수의 주기적 증가, 산악지역 가공 송전선로의 태풍, 낙뢰 등의 영향으로 인한 증가 패턴, 지중 송전선로와 변압기 대비 가공 송전선로 GIS 차단기의 동작 횟수 증가 폭이 더 큼을 확인할 수 있었다.

선정한 92개의 GIS 차단기에 대하여 각각의 차단기에 대한 보호계전기 동작 데이터를 찾아 검토하여, 전체 동작횟수 대비 휴전, 고장 동작횟수 비율을 분석하였다. 용도별 분류는 가공 송전선로, 지중 송전선로, 변압기, BUS TIE[26]로 하였고, [그림 4-5], [그림 4-6]과 같다.



[그림 4-5] GIS 용도별 휴전조작 횟수 비율

26) 변전소의 모선과 모선을 연결하는 용도의 차단기



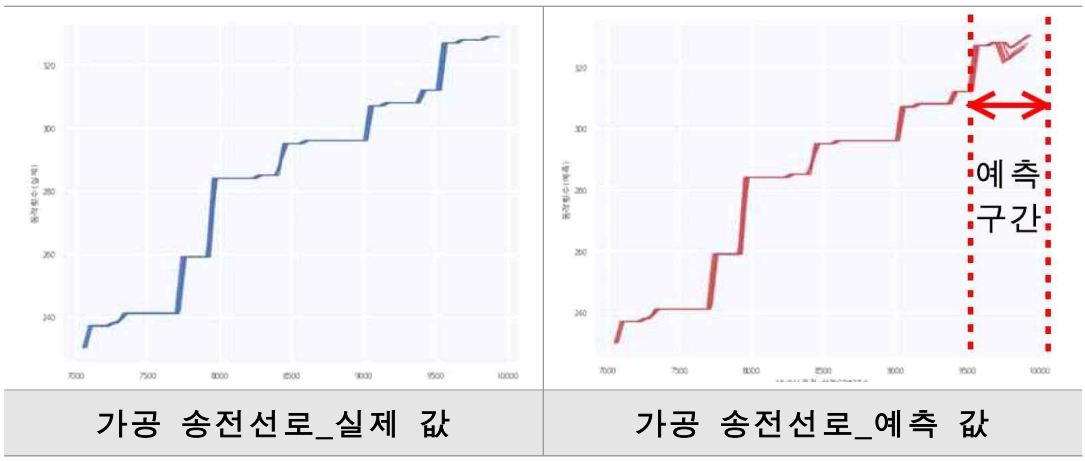
[그림 4-6] GIS 용도별 고장동작 횟수 비율

GIS 용도별 휴전조작 횟수와 고장동작 횟수 분석으로 전체 동작 횟수 대비 부하차단 횟수 비율과 고장전류 차단 비율을 파악할 수 있었다. 고장 비율은 송전선로가 외부 환경에 노출되어 있는 가공 송전선로 GIS가 5% 이상으로 제일 높았고, 휴전 비율은 상대적으로 휴전 허가가 어려운 고객선로 GIS가 제일 낮음을 알 수 있다.

4. GIS 동작횟수 예측 Simulation

GIS 동작 횟수 예측을 위해 특정 기간(24주)에 대해서, 가공 송전선로 GIS에 대한 Simulation을 시행하고[27] 실제 동작 데이터와 비교하였다[그림 4-7]. 기간을 24주로 정한 이유는 내년도 설비 교체계획을 금년 상반기에 세우기 때문이다.

이 Simulation에서는 동작 횟수 누계에서 실제 값(329회)보다 예측 값(330회)이 +1 만큼의 차이를 보였다[표 4-4].



[그림 4-7] GIS 동작횟수 예측

27) LSTM (Long Short-Term Memory) 알고리즘 적용

[표 4-4] 실제값과 예측값 차이

구 분	GIS 동작 횟수		비 고
	시작값	종료값	
실제값	328	329	
예측값	321	330	

5. GIS 동작분석 알고리즘

차단기 동작은 고장전류 차단, 일상적인 부하전류 차단 그리고 조작시험 등의 사유로 인한 전류가 통전하지 않는 상태에서의 무부하 차단이 있고 [그림 4-8]은 차단기 총 동작횟수의 구성을 나타낸다. 또한, 이러한 차단 종류에 따라 기기에 미치는 Stress의 크기는 식 (4.1)과 같다.

$$\text{고장전류차단} > \text{부하전류차단} > \text{무부하차단} \qquad (4.1)$$

[그림 4-8] 차단기 총 동작횟수 구성 예

차단 전류 크기에 따른 정밀한 교체순위 판정을 위해서는 고장전류와 부하 차단을 구분하여야 하나, 주어진 기존 데이터인 차단기 카운터의 ① 총 동작횟수, ② 주별 동작 누계 데이터만을 활용하여 전류(고장+부하)/무부하 차단을 구분하기 위해 '동작 변화량(x)'를 적용하였다. 이는 주간 단위 동작 누계 데이터의 변화가 있을 때 이를 고장/부하 차단 1회로 산정하는 것[28]으로 산식과 판정표는 아래와 같다.

$$x(\text{동작변화량}) = \text{금주 동작 누계} - \text{전주 동작 누계} \qquad (4.2)$$

[표 4-5] 동작변화량(x) 판정표

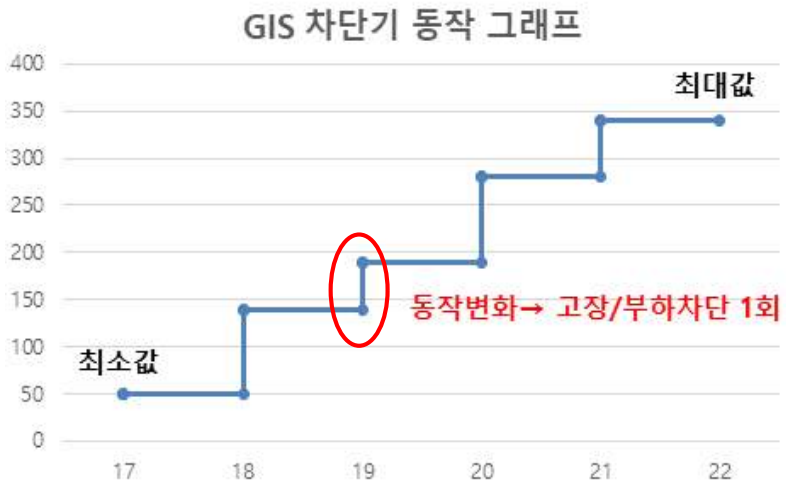
x>0 인 횟수	고장/부하전류 차단 횟수
x=0	차단기 동작 없음
x<0	순시 점검 기록 Error

[그림 4-9]는 GIS 차단기 동작변화량의 개념을 설명하며, 동작변화량에 따른, 고장/부하 차단(전류 차단) 횟수가 정해지면 무부하 차단횟수는 아래 산식에 의해 구할 수 있다.

$$\text{차단기총동작횟수} = \text{고장차단횟수} + \text{부하차단회수} + \text{무부하차단회수}$$

$$\text{무부하 차단횟수} = \text{총동작횟수} - \text{동작변화량}(x) \qquad (4.3)$$

28) 이러한 산정이 가능한 것은, 차단기 점검 시, 운전 중인 상태에서 최초 휴전 조작을 한 이후(부하 차단)에 무부하 조작 시험을 여러 번 시행하기 때문이다. 결국 주간 단위 순시 기록 상에 동작변화량이 발생했다는 것은 최소한 한 번의 전류 차단이 있었다는 것이다. 예) 휴전(개방)→조작시험(n회 동작)→환원(투입), 전류차단 1회 발생

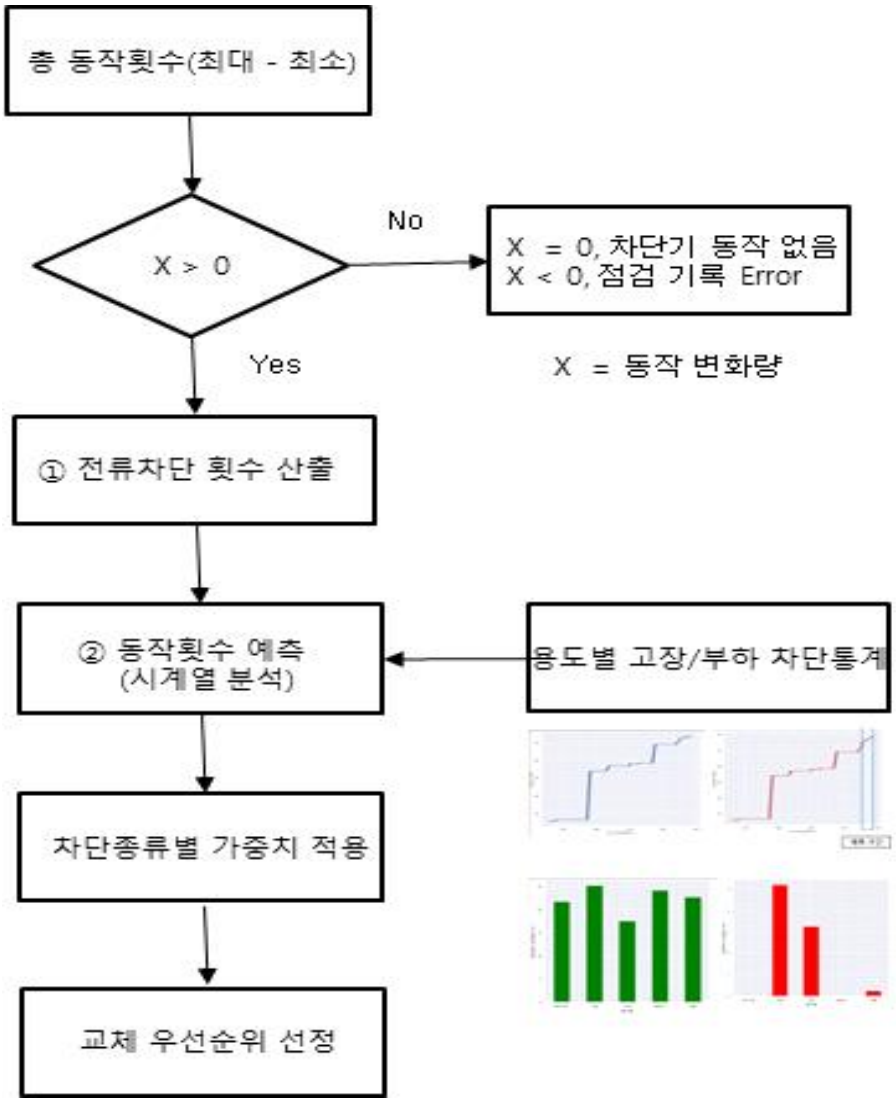


[그림 4-9] 차단기 동작변화량

동작변화량을 통해 주간 단위의 순시 기록을 가지고도, 전류 차단과 무부하 차단을 산출해 낼 수 있었다. 보다 세밀한 예측을 위해서는 [4.2.3 GIS 동작 패턴 분석]에서 산출한 GIS 용도별 고장/휴전 동작 비율을 적용할 수 있다.

[그림 4-10] 차단기 동작구간 구분 예

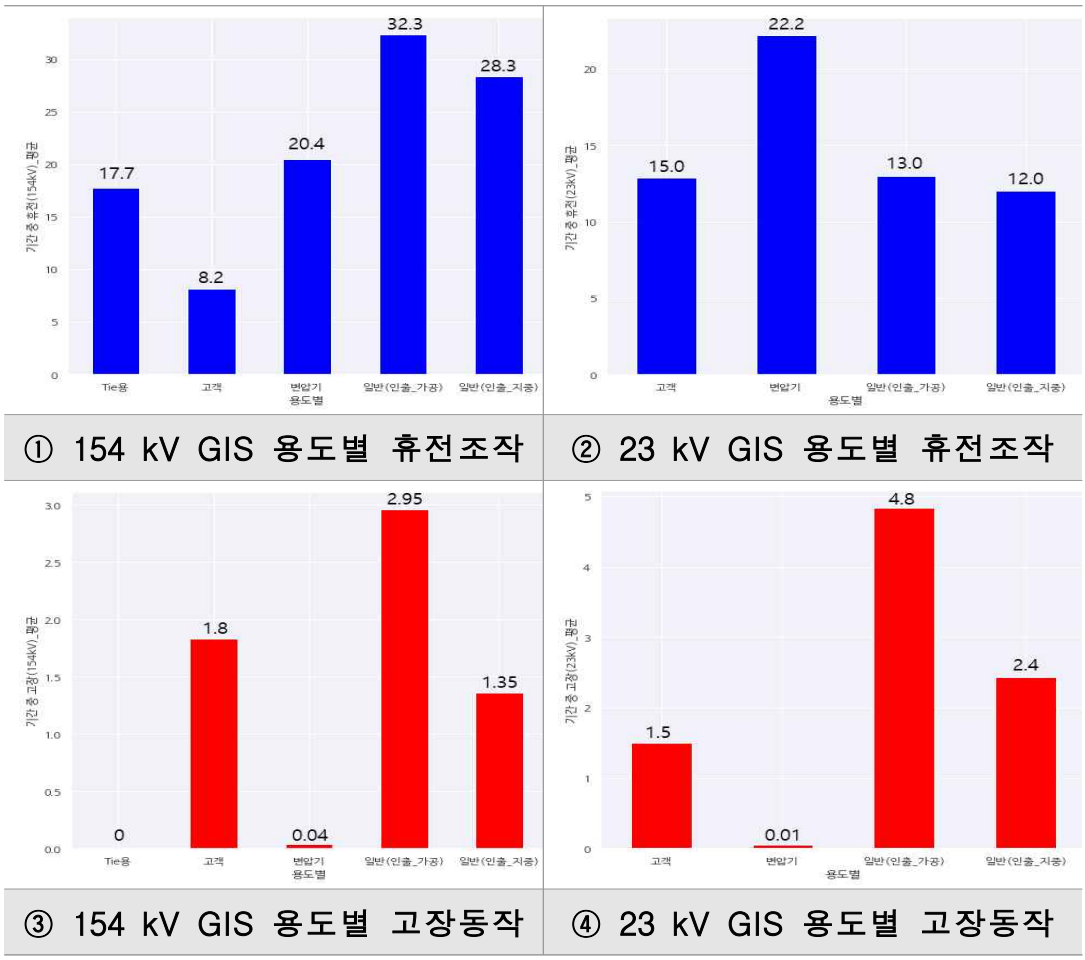
[그림 4-10]의 GIS 차단기 동작분석 구간(① 구간)과 동작횟수 예측 구간(② 구간)에 대하여 ① 동작분석 구간은 동작변화량으로 전류/무부하 차단 횟수를 산정하고, ② 동작횟수 예측구간은 GIS 용도별 고장/휴전 동작 비율을 적용하여 고장/부하/무부하 차단 동작횟수를 산출하여 차단기에 주는 Stress의 크기에 따른 가중치를 적용할 수 있을 것이다. [그림 4-11]은 GIS 교체 운선순위 선정 절차(안)를 나타낸다.



[그림 4-11] GIS 교체 우선순위 선정 절차(안)

제 3 절 GIS 교체 우선순위 산출

개발된 GIS 교체 우선순위 산출 알고리즘 적용을 위하여 제2절 [그림 4-5], [그림 4-6]의 GIS 용도별 휴전조작/고장동작 횟수 비율의 정확도 향상을 위해 통계자료 추출 대상 GIS를 92 Bay에서 637 Bay로 증가시켜 분석을 시행하였고[그림 4-12], 이전 분석 결과와 같은 GIS 용도에 따른 휴전/고장 동작 비율 특성을 나타내었다.



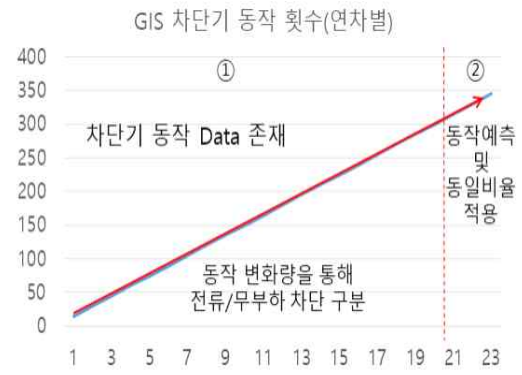
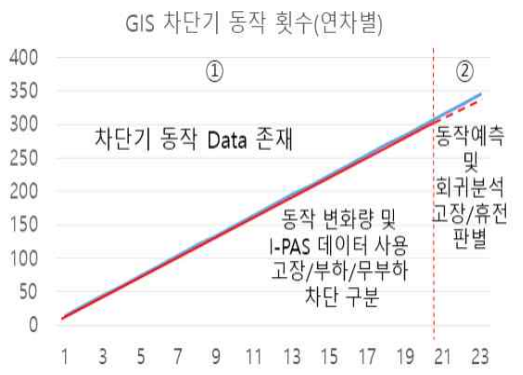
① 154 kV GIS 용도별 휴전조작 ② 23 kV GIS 용도별 휴전조작

③ 154 kV GIS 용도별 고장동작 ④ 23 kV GIS 용도별 고장동작

[그림 4-12] GIS 용도별 휴전/고장 동작 비율

교체 우선순위 산출은 두 가지 Case로 실행하였는데, Case 1은 동작변화량만을 활용하여 [표 4-6]의 ① 차단기 동작분석 구간, ② 동작 예측 구간 전체의 전류(고장+부하) 차단, 무부하 차단만을 구분하고 가중치를 적용하여 우선순위를 산출하는 것이고, Case 2는 ①번 구간의 동작변화량의 고장과 부하차단을 구분하고[29], ② 동작횟수 예측구간은 [그림 4-12]의 GIS 용도별 고장/휴전 동작 비율을 적용하여 고장/부하/무부하 차단 동작횟수를 산출하여 보다 세분화된 가중치를 적용하였다.

[표 4-6] CASE 1, 2 산출 방식 비교

① CASE 1	② CASE 2
	
①번 구간 동작 변화량 산출 **[전류 차단, 무부하 차단]** 구분 → ①, ②구간 동작 비율로 순위 산출	①번 구간 동작 변화량과 고장 집계 **[고장, 부하, 무부하 차단]** 구분 → ①구간 + ②구간 점수 합산
가중치 : 전류차단 5점, 무부하 1점 적용	가중치 : 고장 10점, 부하 3점 무부하 1점

29) 고장 정보 관리 시스템인 i-PAS (Integrated Protection Assistance System)에서 고장 횟수 추출 (동작변화량 - 고장 횟수 = 부하차단 횟수)

[표 4-7]은 Case 1과 Case 2 산출 방식의 장단점 비교를 나타낸다. Case 1은 별도의 수작업 없이 동작변화량을 적용하여 교체 우선순위를 산출할 수 있는 반면, GIS 수명에 큰 영향을 주는 고장전류를 구분할 수 없다는 단점이 있고, Case 2는 고장전류를 구분하여 보다 세분화된 교체 점수를 적용할 수 있으나 이를 위한 고장 데이터의 인력 집계가 필요한 측면이 있다. 교체 대상 설비 중요도와 소요 업무량 등을 고려하여 선택적으로 활용할 수 있을 것이다.

[표 4-7] CASE 1, 2 장단점 비교

구 분	CASE 1	CASE 2
장 점	동작변화량으로 전류, 무부하 차단 구분 → 별도 수작업 불필요	고장, 부하, 무부하 차단으로 세분화하여 교체 점수 산출
단 점	고장, 부하전류 차단 구분 없음	고장 데이터 인력 집계 필요

운영 중인 154 kV 변전소의 154 kV, 23 kV GIS 설비에 대해 Case 1, Case 2를 각각 적용하여 교체 우선순위를 산출한 결과는 [표 4-7], [표 4-8]과 같다.

Case 1 산출 결과

[표 4-8] Case 1 산출결과

SS_name	GIS_name	Score_case1
Test S/S	#2 M.Tr 2차 CB	373.00294
Test S/S	#1 M.Tr 2차 CB	328.39013
Test S/S	#3 M.Tr 2차 CB	299.98212
Test S/S	#2 M.Tr 1차 CB	262.17906
Test S/S	#3 M.Tr 1차 CB	256.67773
Test S/S	A T/L	251.19318
Test S/S	B T/L	206.87831
Test S/S	#1 M.Tr 1차 CB	203.71069
Test S/S	154 kV BUS TIE	189.00693
Test S/S	C T/L	170.17448

Case 2 산출 결과

[표 4-9] Case 2 산출결과

SS_name	GIS_name	Score_case2
Test S/S	#2 M.Tr 2차 CB	295.36439
Test S/S	#1 M.Tr 2차 CB	275.47476
Test S/S	A T/L	256.97469
Test S/S	#2 M.Tr 1차 CB	233.39301
Test S/S	B T/L	231.22452
Test S/S	#3 M.Tr 2차 CB	225.50212
Test S/S	#3 M.Tr 1차 CB	220.74503
Test S/S	154 kV BUS TIE	198.35225
Test S/S	#1 M.Tr 1차 CB	181.90163
Test S/S	C T/L	131.51924

Case 1, Case 2 교체 우선순위 산출결과 Case 2의 세분화된 가중치 적용에 따른 차이[표 4-6 참고]는 있었으나, 전체적으로 유사한 결과를 나타내었다.

향후, GIS 교체 계획을 수립할 경우, 특히 동일 제작년도 GIS 중에서 예산 등의 제약으로 교체 우선순위를 지정해야 할 경우, 본 알고리즘을 활용할 경우 교체 우선순위에 대한 정량화된 기준을 제공할 수 있을 것이라 기대한다.

제 5 장 결 론

본 연구는 보다 합리적인 GIS 교체 판정을 위한 레퍼런스를 주기 위하여, 과거 축적된 전력 데이터를 사장시키지 않고 최대한 활용하기 위한 방법의 모색에서 시작되었다.

이를 위하여 GIS 차단기의 주간 단위 동작횟수가 특정한 패턴을 가진다는 가설 하에, 이 동작 패턴분석을 통하여 전류 차단과 무부하 차단 등을 판별할 수 있는 차단기 동작구분 알고리즘을 개발하였고, 이를 활용한 GIS 교체 우선순위 선정(안)을 제시하였다.

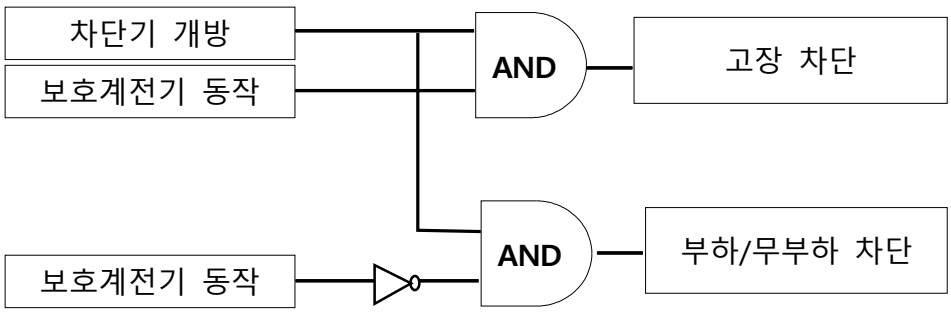
향후, GIS 교체 계획 수립 시, 본 연구 결과를 활용한다면 실제 GIS 동작 데이터에 근거한 설비 교체 계획 수립으로 전력 설비 신뢰도 향상과 합리적인 설비 운영에 도움을 줄 것이다. 또한 설비 투자비용 예측으로 예산 집행 계획 정확도 향상에도 기여할 것이다.

이미 전력설비에 각종 센서를 부착하여 실시간 설비 상태 데이터 취득 및 분석이 가능한 종합 예방진단 시스템이 2019년도부터 단계적으로 설치 진행 중이다. 또한 신규 건설 변전소는 IED[30]를 적용한 디지털변전소로 건설되어지고 있다. 전력설비에서 발생하는 데이터를 취득하고 활용할 수 있는 인프라가 구축되어지고 있는 것이다.

30) 지능형 전자 장치 : 변전소 전력설비의 각종 정보를 디지털화된 데이터로 변환하여 통신하는 기기

하지만 여전히 GIS 차단기의 운전 수명을 결정하는 주요 인자인 차단기 동작 회수 기록은 기계식 카운터를 보고 수기로 시스템에 저장되어지고 있다. 이런 상황이니 고장/부하/무부하 차단 횟수도 구분이 안되는 것도 당연하다.

IED 적용 디지털변전소인 경우에는 IED에 [그림 5-1]과 같은 간단한 로직을 추가하는 것만으로 차단기 동작 시, 고장차단 여부를 판정할 수 있을 것이고, 차단 시 차단전류를 반영할 수 있다면 더 정확한 데이터를 취득하여 활용할 수 있을 것이다.



[그림 5-1] IED 로직 개선 예

전술한 예와 같이 전력설비에서 발생되는 데이터를 발굴하여 Big Data로 활용하는 것이 자산으로서의 전력 데이터의 가치를 높이고 구축되고 있는 전력 디지털 인프라를 충분히 활용하는 일이라 판단된다.

참 고 문 헌

[1] Wikipedia, “Northeast blackout of 2003” , 2022

[2] 한기선, “변전설비 신뢰도 향상을 위한 실증시험장 구축 및 시험기술 개발 (연구개발사업계획서)” , 한국전력공사, 2019. 3, pp. 3

[3] 한국전력공사, “변전정비기본반” , 2022, 7장 pp. 20-27

[4] 장용무, “초고압 GIS 고체절연재료에 대한 가속수명시험” , 대한전기학회 학술대회 논문집, 2020. 7, pp. 1537

[5] 김국헌, 김태효, 이성섭, “안전필수 시스템 제어 설계” , 2021. 7, pp. 125

[6] 한국전력공사, “변전설비 고장통계 및 분석” , 2016 - 2021

[7] 김정태, “고장데이터를 이용한 대용량 전력설비 통계적 수명분석” , 대한전기학회 논문집, 2017. 11, pp. 1607 - 1611

[8] CIGRE WG B3.17, "Residual Life Concepts Applied to HV GIS",Technical Brochure No.499, 2012

[9] 한국전력공사, “변전설비 중기보강 기준서” , 2015, pp. 28-29

[10] 한국전력공사, “변전설비 유지보수 기준” , 2016, pp. 16-17

[11] 한기선, 윤진열, 주형준, 구선근, 박기준, “FMECA를 이용한 가스절연개폐장치 고장분석 및 치명도 평가” , 대한전기학회 학술대회 논문집, 2010. 7, pp. 375

[12] 한국전력공사 “가공개폐기 잠정 교체기준 및 향후계획” , 2015

[13] 조진성, 한기선, 박민혜 “변전설비 실증시험장 구축 및 시험 기술 개발”, 대한전기학회 학술대회 논문집, 2019

[14] 한국전력공사 “72.5kV이상 친환경 가스절연개폐장치 구매규격”, 2022, pp. 7

[15] 문병선, 탁의균, 이태규, 박찬의, 이민호, “절연가스 성분분석을 통한 154kV 가스절연변압기 내부결함 판정”, 대한전기학회 학술대회 논문집, 2015. 7, pp. 448

[16] 한국전력공사 “154kV 친환경 개폐장치 가속열화시험 추진”, 2021

Abstract

A Study on Gas Insulated Switchgear Management Plan based on Performance Data Analysis

Jinsung, Cho
Department of Engineering Practice
Graduate School of Engineering Practice
Seoul National University

This study proposed a method for calculating GIS replacement priority based on actual facility operation data to reasonably determine the replacement of old Gas Installed Switchgear (GIS), the main switchgear that constitutes the electric power system.

To this end, the limitations of statistical life management, which is the current GIS replacement standard, were reviewed,

and the use of existing GIS operation data that is not stored in a form suitable for facility status analysis and statistical processing was studied.

Existing data were limited to use in facility management because only weekly operation performance and total operation accumulation were recorded based on mechanical counter installed in GIS, regardless of the type of operation such as current interruption or no-load interruption.

To overcome this limitation, the operation pattern of GIS for each use was confirmed through the analysis of GIS operation records under the hypothesis that the number of weekly operations of GIS circuit breakers has a specific pattern, and using this, an algorithm was developed to distinguish current interruption and no-load interruption only with existing GIS operation data.

When establishing a GIS replacement plan that requires a huge budget, if the results of this study are used, it will contribute to improving the reliability of power facilities and reasonable budget execution by establishing a facility replacement plan based on

the actual facility condition.

Keywords : GIS, Operation data, GIS operation pattern, GIS replacement plan

Student Number : 2021-22291