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

# 불평형 충전용량에 의한 GPT 철공진 분석 및 방지대책

GPT Ferro-resonance analysis and prevention measures by unbalanced charging capacity

2022년 2월 25일

서울대학교 공학전문대학원

응용공학과 응용공학전공

윤 수 화

# 불평형 충전용량에 의한 GPT 철공진 분석 및 방지대책

지도교수 문 승 일

이 프로젝트 연구보고서를 공학전문석사 학위 연구보고서로 제출함

2022년 2월

서울대학교 공학전문대학원
응용공학과 응용공학전공
윤 수 화

윤수화의 공학전문석사 학위 연구보고서를 인준함

2021년 12월

위 원 장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

# 국문초록

전력계통에서 PT의 비선형적 유도용량(  )과 계통의 충전용량($X_C$)의 값이 같아지거나 비슷해져서 발생하는 철공진은 다양한 원인으로 전력계통에서 지속적으로 발생하는 문제점이며 설비에 큰 악영향을 미치기 때문에 전력산업 기술자들에게 오랫동안 꾸준히 해결법을 요구하고 있다.

특히 345kV M.Tr 3차측 GPT에서 발생하는 철공진의 원인을 해소하고자 개선된 포화전압을 적용한 GPT를 설치하여 인덕턴스(L)의 비선형성을 제거하거나 추가 커패시터(C)를 345kV M.Tr 3차측에 설치하여 철공진이 발생하는 계통조건을 제거하는 노력이 있었으며 어느 정도 효과를 거두고 있다. 그러나 여전히 철공진에 의한 고장발생과 전력설비 소손은 꾸준히 일어나고 있으며 추가적인 원인에 대한 분석과 해결방법 제시되어야 한다.

이에 본 연구보고서는 사전연구에서 다루지 않은 불평형 충전용량($X_C$)이 철공진에 미치는 영향에 대해 연구하고 해결방법을 제시하였다. 분석한 사례는 345kV M.Tr 3차측 케이블 긍장의 차이로 인한 충전용량의 차이로 발생하는 상시 영상과전압에 대한 사례와 345kV M.Tr 3차측 개폐장치 비동기 개방 시 방전전류로 인한 불평형 충전용량이 영상과전압과 철공진을 일으킨 사례이다.

사전연구에서 반영하지 않은 케이블 긍장 차이에 의한 충전용량, 전력설비(M.Tr, GPT)의 선간(phase to phase), 상-대지 간(phase to ground) 충전용량을 현장 실측하여 EMTP Modeling을 설계하는데 반영하였으며 실제 파형과 모의 파형의 유사성을 비교하고 계산된 상승전압과 모의된 상승전압의 크기 비교하는 검증과정을 거쳐서 Modeling의 신뢰도를 확보하였다.

검증된 EMTP Modeling을 통해서 345kV M.Tr 3차측 개폐장치의 비동기 개방으로 인한 불평형 충전용량을 해소하는 방안으로 GPT 2,3차측 제한저항을 설치하여 불평형충전용량을 일으키는 방전전류의 귀로를 형성하는 방법을 제시하였다. 제한저항을 설치하였을 때의 효과를 저항의 크기, 투입시간, 방전전류의 크기 등 다양한 변수를 고려하여 모의하였으며 최적의 제한저항의 크기와 투입시기를 제시하였다. 이 결과를 실계통에 적용하여 개폐장치 개방 시 영상과전압과 철공진이 해소됨을 실증하였으며 전사적으로 적용할 예정이다.

본 연구결과는 전력계통 설계 전 EMTP 해석을 통해 철공진을 예방하는 시간이 많이 걸리며 복잡한 방법을 대체하여 일반적으로 적용할 수 있는 방법을 제시함으로 전력산업에 많은 이점을 가져다줄 것으로 생각한다.

주요어 : 철공진, 충전용량, 불평형, 제한저항, 영상과전압, 설비소손
학　번 : 2020-22545

# 목 차

제 1 장 서 론 ····· 1
제 1 절 연구의 배경 및 필요성 ····· 1
제 2 절 연구보고서의 개요 및 구성 ····· 3

제 2 장 이론적 배경 ····· 5
제 1 절 철공진의 발생원인 ····· 5
1. 전력계통 진동현상 ····· 5
2. 전력계통 공진현상 ····· 8
제 2 절 GPT 철공진의 발생원인 ····· 11

제 3 장 선행연구 고찰 ····· 16
제 1 절 추가 커패시터 설치 ····· 16
제 2 절 포화전압 개선에 의한 비선형 인덕턴스 해소 ·· 18
제 3 절 선행연구의 한계 ····· 25

제 4 장 불평형 충전용량에 의한 철공진 ····· 26
제 1 절 전력계통 현상분석 ····· 26
1. 상시 불평형 충전용량에 의한 영상전압 발생 ····· 26
2. 개폐장치 개방 시 불평형 충전용량에 의한 철공진 ···· 28
제 2 절 EMTP Modeling 용 데이터 측정 ····· 30
1. 345kV BUS Imp 및 M.Tr imp ····· 31
2. GPT 여자특성 측정 및 변환 ····· 31
3. 계통 충전용량 측정 및 변환 ····· 33
제 3 절 EMTP Modeling 설계검증 및 적용 ····· 35

1. EMTP Modeling 설계검증 ····· 35
2. EMTP Modeling 적용 ····· 38
제 4 절 전력설비 적용 및 검증 ····· 45

제 5 장 결론 ····· 47

참고문헌 ····· 49

# 표 목 차

[표 3-2-1] 345kV M.Tr 3차측 충전용량 ····· 22
[표 3-2-2] GPT 포화전압과 계통충전용량에 따른 중성점 ····· 24
[표 4-2-1] GPT 포화전압 측정결과 ····· 32
[표 4-2-2] 345kV M.Tr 및 3차측 GPT 충전용량 ····· 34
[표 4-3-1] 제한저항의 크기에 따른 영상전압 1 ····· 41
[표 4-3-2] 제한저항의 크기에 따른 영상전압 2 ····· 42
[표 4-3-3] 제한저항의 투입시기에 따른 영상전압 ····· 43
[표 4-3-4] 상시 영상전압 발생 시 개폐장치 비동기 개방 ····· 44

# 그 림 목 차

[그림 2-1-1] 전력계통 LC 진동현상 ····· 7
[그림 2-1-2] RLC 직렬회로에서 공진 시 등가회로 ····· 9
[그림 2-1-3] RLC 병렬회로에서 공진 시 등가회로 ····· 10
[그림 2-2-1] 철공진으로 인한 절연파괴 ····· 11
[그림 2-2-2] 345kV M.Tr 권선결선도 ····· 12
[그림 2-2-3] 345kV M.Tr 3차측 PT 구성도 ····· 13
[그림 2-2-4] 개패장치 투입 시 각 상의 전압크기 ····· 14
[그림 3-1-1] 345kV M.Tr 3차측에 추가된 커패시터 ····· 17
[그림 3-2-1] 상시 영상과전압 발생 파형 ····· 19
[그림 3-2-2] 345kV M.Tr 3차측 GPT 명판 ····· 21
[그림 3-2-3] EMTP Modeling을 통한 중성점 이동 파형 ····· 23
[그림 4-1-1] 345kV 예비변압기 ····· 27
[그림 4-1-2] 345kV M.Tr 3차측 비접지 △결선 ····· 28
[그림 4-1-3] 345kV M.Tr 3차측 영상과전압 발생파형 ····· 29
[그림 4-1-4] 345kV M.Tr 3차측 등가회로 ····· 30
[그림 4-2-1] 포화전압측정 데이터 ····· 33
[그림 4-3-1] EMTP Modeling ····· 36
[그림 4-3-2] 불평형 충전용량에 의한 중성점 이동 ····· 36
[그림 4-3-3] 방전전류 및 방전전하량 ····· 37
[그림 4-3-4] EMTP 모의 시 영상과전압 ····· 38
[그림 4-3-5] 방전케이블 길이에 따른 영상전압 ····· 39
[그림 4-1-1] GPT 3차측 제한저항 미설치 ····· 45
[그림 4-1-2] GPT 3차측 제한저항 100Ω 설치 ····· 46

# 제 1 장 서론

## 제 1 절 연구의 배경 및 필요성

철공진은 전력계통에서 변압기의 열화현상, 개폐서지와 같은 과도현상에 의한 전압과 전류 파형의 왜곡, 비접지 계통에서의 중성점의 이동, 반전, 진동에 의해 변압기가 포화되어 인덕턴스(L)의 비선형성이 계통의 커패시턴스(C) 성분과 거의 같은 값을 가질 때 큰 진폭을 만들어내는 공진현상이다. 전력계통에서의 철공진은 전력계통의 케이블, 변압기 외함, 개폐장치 개방 시 존재하는 커패시턴스와 변압기의 설계특성에 따라 발생하는 현상이므로 과도현상 프로그램을 이용하여 LC등가회로로 변환하여 해석한다. LC직렬회로는 임피던스가 최소가 되어 전류값이 최대가 되는 현상이고 LC병렬회로는 어드미턴스가 최소가 되어 전압이 최대가 되는 현상이다. 전력계통에서는 LC직렬공진 및 LC병렬공진이 등가회로 모델에 따라 번갈아가며 나타나며 전력설비를 소손시키는 사례가 빈번하다.

LC직렬공진 및 LC병렬공진이 일어나기 위해서는 PT가 포화되어 유도용량(  )의 하락과 충전전류나 개폐기의 개방 시 케이블의 충천용량($X_C$)의 값이 같을 때 나타난다. 따라서 철손이 작고 효율이 좋은 배전선로용 PT에서 포화가 쉽게 일어나고 345kV 변압기 3차측 비접지용 PT에서 중성점 이동에 의한 과전압으로 PT포화가 쉽게 일어나므로 이

조건에서 철공진이 빈번하게 이루어지고 있다. 최근 5년간 철공진에 의해 보고된 고장 건수는 지상개폐기내 PT고장이 총 44건, 345kV 변압기 3차측 GPT 고장이 총 22건으로 상당히 자주 발생하는 문제점이다. 이는 한국전력공사 설비에서만 보고되는 수치이며 타사의 설비를 종합해 보면 더 큰 수치가 나올 것으로 예상된다.

철공진현상은 높은 전압과 전류가 발생하기 때문에 PT에 직접적인 소손을 일으키고 관련 설비의 소손으로 파급되기 때문에 배전반, 변압기 등의 중요설비의 절연파괴 사례도 나타나고 있다. 따라서 철공진을 예방하고자 많은 해결방법이 제시되고 있으며 계통의 구조나 설치된 설비(PT)의 규격에 따라서 다양한 발생가능성을 두고 있지만 근본적인 문제점인 PT 포화전압 개선에서 특히 많은 해결방법이 제시되고 있다. 배전선로용 PT의 경우 0.2[%]였던 철손을 2.0[%]로 상향시키며 그 문제점을 해결한 것이 최근의 사례이며 345kV M.Tr 3차측 GPT의 포화전압도 기존 .5 에서 $1.9V_n$으로 상향 조정하여 현장에 적용중이다.[사례] 그러나 PT규격의 개선에도 불구하고 철공진을 꾸준히 발생하고 있으며 이는 PT규격의 개선에 의해 포화전압이 높아졌음에도 불평형 충전용량($X$ )이나 개폐서지 같은 요소가 포화전압보다 높은 과전압을 발생시키고 결국 PT포화로 인한 유도용량($X_L$)을 감소시키는 현상이 발생하기 때문이다. 이는 PT포화특성 개선으로만 해결하는데 기술적, 경제적인 한계가 있으므로 제한저항을 설치하여 영상전류의 귀로를 만들어서 중성점 이동을 방지한다던지 불평형 충전용량($X_C$)을 해소하여 과전압을 방지하는 방법을 연구할 필요가 있어 보인다.

본 연구에서는 345kV M.Tr 3차측 비접지 GPT에서 개폐장치 개방시 비동기 개방으로 인한 영상전류가 **불평형 충전용량**을 일으키고 최종적으로 철공진을 일으킨 실제 사례와 345kV M.Tr 3차측 케이블 길이의 차이로 인한 **상시 불평형 충전용량**이 영상과전압을 발생시킨 실제사례를 연구하여 ATP-Draw Program을 통해서 Modeling하여 분석하고 그 해결책도 제시하려고 한다.

## 제 2 절 연구보고서의 개요 및 구성

본 연구에서는 345kV M.Tr 3차측 비접지 GPT에서 불평형 충전용량이 철공진을 발생시키는 현상을 ATP-Draw Program을 통해서 Modeling하여 분석하였다. 그리고 검증된 EMTP-Modeling을 통해서 해결방법을 제시하여 실제 계통에 적용하여 문제를 해결하였다.

제 1장에서는 본 연구보고서의 배경 및 내용 그리고 연구보고서의 구성 및 개요에 대해서 기술하였다.

제 2장에서는 철공진이 발생하는 원인에 대해서 전기학적인 설명을 하고 구체적으로 345kV M.Tr 3차측 비접지 GPT의 철공진 현상에 대해서 발생원인을 살펴볼 것이다.

제 3장에서는 철공진을 예방하기 위한 선행연구에 대해서 살펴보고 선행연구의 한계와 그것을 해결하기 위한 방법에 대해서 고찰해보겠다.

제 4장에서는 불평형 충전용량으로 철공진이 발생한 실제사례를 연구하여 현장의 데이터를 수집하고 분석하여 ATP-draw program으로

EMTP Modeling하고 현장과 EMTP Modeling의 파형을 비교하여 Modeling의 신뢰성을 검증할 것이다. 검증된 Modeling을 통하여 충전 용량이 철공진을 발생시키는 영향에 대해서 구체적으로 분석하고 해결책을 제시할 것이다. 그 해결책을 현장에 적용하는 것이 이 연구보고서의 최종 목표이다.

제 5장에서는 본 연구의 연구사항을 정리하고 연구의 한계점과 향후 연구방향에 대해서 기술해보겠다.

# 제 2 장 철공진에 대한 이론적 배경

## 제 1절 전력계통의 철공진 발생원인

전력계통의 회로는 구성하는 차단기의 극간 콘덴서, TRV 억제콘덴서, 케이블, 변압기, PT함의 상간 및 대지 간 정전용량(  )과 PT의 비선형 유도용량($X_L$)에 의해 철공진현상이 발생한다. 이러한 철공진 현상은 모든 권선형 PT에 자체적으로 발생하는 것이 아니고 해당의 회로조건이 구성될 때 발생되며 과전압과 과전류를 발생시켜 각종 Fuse을 단선시키고, 때로는 관련 PT의 소손, 변압기의 소손, 계통의 절연을 파괴하거나, 피뢰기나 다른 기기들을 파괴시킬 수도 있다. 철공진에 대한 원인을 알아보기 위해서는 저항(R), 인덕터(L), 커패시터(C)로 이루어진 전기회로에서의 진동현상과 공진현상에 대한 이론적 배경이 선행되어야 한다.

### 1. 전력계통 진동현상(oscillation)

전력설비에서의 공진현상을 설명하기 위해서 전력계통이 포함하고 있는 저항(R), 인덕터(L), 커패시터(C)의 특성 그리고 RLC진동현상에 대해 먼저 알아볼 필요가 있다.

인덕터는 전류의 불연속적인 변화를 연속적인 변화로 만들어주는 소자

이다. 인덕터 특성식 $t) = L\frac{di(t)}{dt}$ 전류의 연속성을 나타내며 오직 에너지를 소비하는 저항(R)달리 자기에너지를 저장 및 방출하는 reactance의 성질을 가진다. 이 때 자기에너지의 크기는 $W = \frac{1}{2}Li^2$으로 나타난다. 반면 커패시터는 전압의 불연속적인 변화를 연속적인 변화로 만들어주는 소자이다. 커패시터의 특성식 $I(t) = C\frac{dv(t)}{dt}$ 전압의 연속성을 나타내며 정전에너지를 저장 및 방출하는 reactance의 성질을 가진다. 이 때 정전에너지의 크기는 $W_e = \frac{1}{2}CV^2$으로 나타난다.

역학에서의 진자운동(pendulum)은 진자의 위치에 따라 위치에너지($E_h$)와 운동에너지($E_k$)를 교환하는데 공기나 실의 마찰이 없다면 무한 진자운동을 하게 된다. 전력계통에서도 마찬가지로 LC회로에서 자기에너지($W_m$)와 정전에너지($W_e$)가 서로 교환하게 되며 저항이 없다면 서로의 에너지를 이상적으로 무한으로 주고받는 진동현상을 일으키게 된다. 자기용량($X$)과 정전용량($X_C$)이 같아져서 서로 주고받는 에너지의 크기가 같아지는 주파수가 진동주파수이며 임피던스로 볼 때 $X_C = \frac{1}{wC}$이고 $X_L = wL$이므로 $X_C$는 주파수가 커질수록 그 값이 작아지며 $X_L$은 주파수가 커질수록 그 값이 커지므로 특정주파수에서는 $X_L = X_C$가 되어 같은 용량으로 같은 에너지를 주고받을 수 있는 현상이 일어날 수 있는 것이다. 이 때 진동주파수를 구해보면 아래의 식과 같다.

$$X_C \qquad \text{(식 2.1.1)}$$

$$2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$f_{\text{동}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

위의 진동주파수에 따라서 부하가 탈락하는 개폐장치 개방상황과 같이 특정 계통에서 그림 2.1.1과 같이 진동주파수에 따른 진동현상과 저항에 의한 에너지소모 현상을 관찰할 수 있다. 이 현상은 기본전압파형( ) 의 2배까지( $V_n$) 순간적으로 상승하므로 전력기기에 지속적인 데미지를 주며 빈도나 횟수에 따라 절연파괴를 일으키기도 한다.

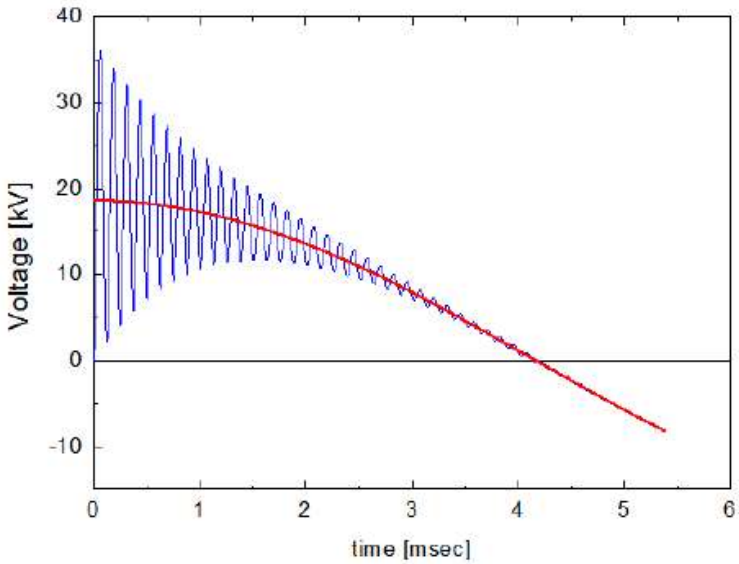


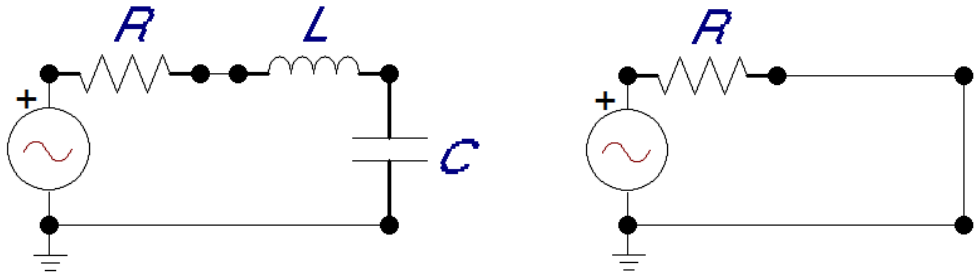

그림 2.1.1 전력계통 LC진동현상

(L=1[mH], C=400[pF], R=2$\Omega$)

## 2. 전력계통 공진현상(resonance)

이와 같이 전력계통에서의 진동현상은 개폐장치의 투입과 개방 등의 이유로 순간적인 RLC회로에서 자기에너지(  )와 정전에너지($W_e$)가 충전과 방전을 반복하고 저항이 에너지를 소모하는 결과라고 볼 수 있다. 이번에는 주파수의 크기를 계통주파수인 60Hz로 동일하게 유지하고 RLC소자의 크기를 변화시킨다면 LC소자가 특정 값에서 자기용량($X$)과 정전용량($X_C$)이 동일한 값으로 같은 에너지를 충전과 방전하게 된다. 이때 회로에서의 L소자와 C소자는 마치 단락이나 개방과 같이 계통에 전혀 영향을 미치지 않는 상태와 마찬가지이다. 이러한 현상이 RLC 직렬회로에서 일어난다면 임피던스 중 저항의 성분만이 남으므로 그 값이 매우 작아져서 전류가 매우 커지게 되는 직렬공진현상이 그림 2.1.2과 아래의 식 2.1.2으로 나타난다.

$$R + jwL + \frac{1}{jwC} \qquad \text{(식 2.1.2)}$$
$$= R + j(wL + \frac{1}{wC})$$
$$= R \ (when,\ f = \frac{1}{2\pi \ LC})$$




(a) 정상회로 (b) 공진회로

그림 2.1.2 RLC직렬회로에서 공진 시 등가회로

그리고 RLC병렬회로에서 일어난다면 어드미턴스가 매우 작아져서 전압이 매우 커지는 병렬공진현상이 그림 2.1.3과 아래의 식 2.1.3으로 나타난다.

$$= \frac{1}{R} + \frac{1}{jwL} + jwC \qquad \text{(식 2.1.3)}$$

$$= \frac{jwL + R + jwC \cdot R \cdot jwL}{R \cdot jwL}$$

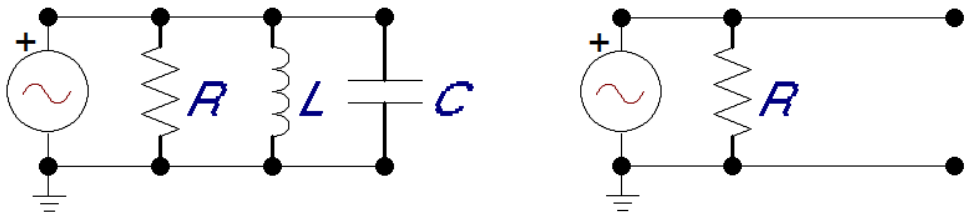
$$Z = \frac{jwRL}{R - w\ RLC + jwL}$$

$$= \frac{jwRL\{(R - w^2RLC) - jwL\}}{(R - w^2RLC) + jwL\}\{(R - w^2RLC) - jwL\}}$$

$$= \frac{w^2RL^2}{(R - w^2RLC)^2 + w^2L^2} + j\frac{wR^2L(1 - w^2LC)}{(R - w^2RLC)^2 + w^2L^2}$$

$$R(when,\ f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}})$$

병렬공진은 직렬공진보다 식이 복잡하지만 허수부를 0으로 만드는 값을 생각해본다면 $L(1-w^2RLC)=0$을 만족하기 위해서 괄호 안에 식인 $1-w^2LC=0$을 만족해야하므로 직렬공진과 마찬가지로 $f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$일 때 $Z=R(when,\ f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}})$을 만족하게 된다.




(a) 정상회로 (b) 공진회로

그림 2.1.3 RLC병렬회로에서 공진 시 등가회로

RLC 병렬공진 및 직렬공진에 대한 해석을 공진주파수를 기준으로 정상상태에 대한 해석을 살펴보았다. 실제 전력계통에서의 공진현상은 L, C성분의 과도현상에 의한 현상이므로 미분방정식이나 과도현상 분석프로그램을 통한 해석이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 미분방정식에 대한 해석은 생략하고 과도현상 분석프로그램을 통한 해석만 진행하기로 한다.

## 제 2절 GPT 철공진의 발생원인,

한전에서 운용중인 345kV M.Tr 3차측 비접지 GPT에서는 특히 비접지의 특성으로 인해 철공진 조건이 발현되기 쉽다. 계통의 중성점이 없기 때문에 개폐장치의 개폐시간차, 외부 단락 및 1선 지락고장의 복귀, 회로의 폐로조건에 따라서 중성점이 이동, 진동하며 진전되어 반전으로 발전하기도 한다. 이 현상은 한 상(one phase)에 과전압이 발생시켜 철심이 포화되고 낮아진 자기용량(  )과 계통의 대지 간 충전용량($X$)이 철공진을 일으킨다. 이 때 대지전압이 정격전압의 수배에 달하게 되어 그림 2.2.1과 같이 절연파괴가 일어나게 된다.

그림 2.2.1 철공진으로 인한 절연파괴

위에서 살펴보았듯이 철공진은 계통주파수가 $X_C$의 조건이 만족하는 진동주파수 $f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$ 와 같을 때 나타나므로 계통정수 $X_L$과 $X_C$의 값은 설계 시 반드시 고려해야 할 사항이다. 보통 $X_L/X_C$를 10배 이상의 값으로 설계하여 공진의 발생을 억제하지만 철심의 포화로 인해 $X_L$의 값이 급격하게 떨어진다면 $X_L/X_C$의 값은 1에 수렴하게 되고 이때 철공진 현상이 발생하게 된다. 이외에도 $X_L/X_C$의 값이 1에 수렴하게 되는 다양한 경우가 있으며 이 모든 상황을 철공진이 일어나기 쉬운 조건이라고 해석해도 무방할 것이다.

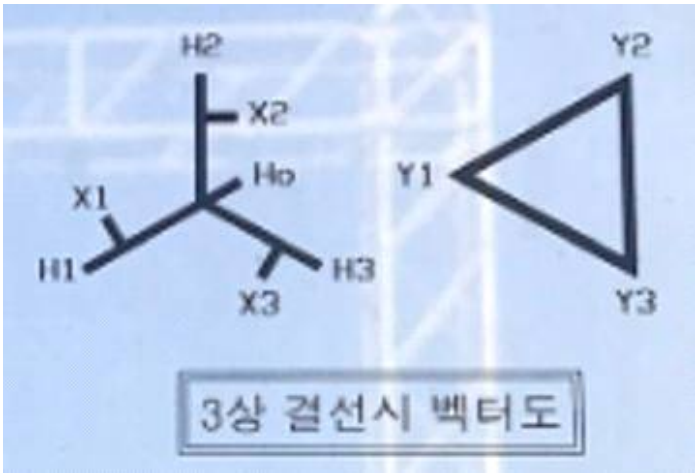



그림 2.2.2

그림 2.2.2의 한전 345kV M.Tr 제원을 살펴보면 YnYnD11결선으로 1,2차측은 Y결선, 3차측은 1,2차측 선간전압보다 30° 앞서는 △결선을 사용하여 비접지 형태이다.

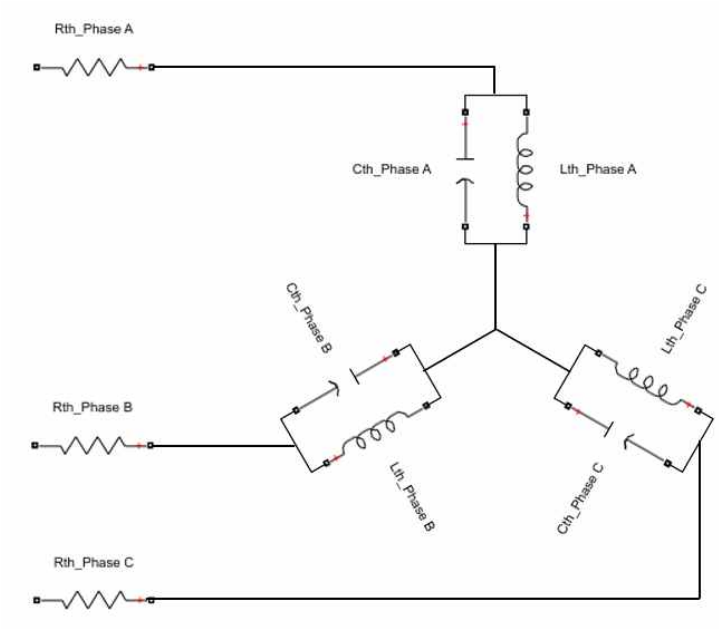
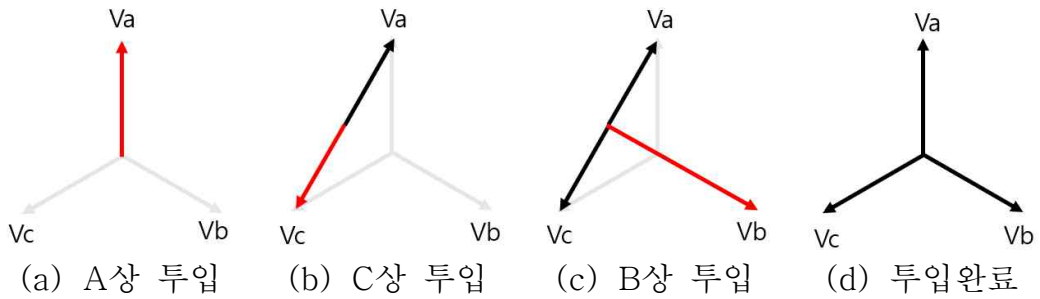



그림 2.2.3 345kV M.Tr 3차측 비접지 PT 구성도

그림 2.2.3과 같이 계통의 대지 간 정전용량과 PT의 자기용량을 등가회로로 나타내면 PT에 걸리는 전압은 $_h$와 $L_{th}$의 값에 따라 상(phase)마다 다른 값을 가지며 이 값이 다르다면 불평형 영상전압을 일으킨다. 위에서 설명했던 현상과 같이 비접지 계통에서 쉽게 일어날 수 있는 중성점 이동으로 인한 과전압 현상으로 철심이 포화되고 $L_{th}$값이 급격하게 낮아진다면 10이상의 비로 유지되던 $X/X_C$의 값이 거의 1에 수렴하면서 철공진을 일으키게 된다.

비접지 영역에서 과전압을 일으키는 요소는 많지만 그 사례 중 개폐기 동기투입의 실폐사례를 그림 2.2.4에서 나타내었다. 개폐장치가 A, C, B상의 순서로 비동기 투입이 된다면 그림 2.2.4 (c)와 같이 마지막에

투입되는 B상의  상전압은 순간적으로 정격에 최대 1.5배의 값을 가진다. 1,5배의 상전압은 1.5  의 포화전압을 가진 PT를 포화시키므로 철공진을 자주 발생시켰다. 지금은 이에 대한 연구가 이루어져서 정격전압의 1.9배에서 포화하는 개선 된 PT를 설치하여 발생 빈도수가 많이 개선되었다. 그러나 여전히 설계의 오류, 설비운전 간 PT 열화, 다른 이유로 인한 과도현상에서의 중성점 반전현상 등의 조건에서는 철공진이 여전히 발생하고 있다.



(a) A상 투입 (b) C상 투입 (c) B상 투입 (d) 투입완료

그림 2.2.4 개폐장치 투입 시 각 상의 전압크기

위의 사례는 주로 LC병렬공진에 대한 이야기를 주로 다루었으나 개폐장치의 개폐 시 개폐기의 절연문제로 개폐기 극간 커패시턴스 값에 의해서 LC직렬공진을 일으키는 사례도 보고되고 있으므로 철공진을 일으키는 사례는 매우 다양하다.

비접지 GPT에서의 철공진의 발생원인은 매우 다양한 형태로 나타나면 대표적인 몇 가지 사례를 아래와 같이 나열할 수 있다.

가) 주어진 회로에서 개패장치 차단 시 개폐기 극간 커패시턴스와 모선의 대지정전용량 그리고 PT의 인덕턴스에 의한 직렬공진

나) 개폐기의 투입과 개방으로 인한 계통구성이 변경되면서 대지 커패시턴스와 PT의 인덕턴스 간 LC병렬공진(주로 개방 시 LC회로의 구성만으로 일어난다)

다) 계통변경이 없었으나 그 밖의 비접지 특성상 중성점 불안정 현상 등이 진전되면서 PT가 포화에 의한 철공진

라) 개폐기의 단상조작 및 비동기 조작에 의한 불평형 충전용량으로 과전압이 유기되어 발생하는 공진

전력계통에서의 철공진 현상은 위에서 살펴본 것과 같이 다양한 형태로 나타날 수 있다. 이러한 철공진 현상은 전력계통이 복잡해지고 사용하는 전압이 높아짐에 따라 그리고 지중케이블의 사용이 많아짐에 따라 그 발생가능성이 매우 높아졌다고 할 수 있다.

# 제 3 장 선행연구 고찰

철공진은 다양한 원인으로 발생됨을 알았다. 그리고 그 해결방법도 계통특성에 따라 다양하게 제시 될 수 있다. 그러나 계통을 가압하기 전 설계단계에서 모든 설비의 특성을 고려하여 EMTP simulation을 하는 것은 매우 큰 노력이 필요하므로 일반적이고 범용적인 해결방법이 제시되고 적용될 수  밖에 없을 것이다. 철공진의 발생원인이

공진주파수 $= \frac{1}{2\pi \quad C}$ 가 60Hz의 계통주파수와 맞을 경우 $X = X_C$ 을 만족하므로 철공진이 발생한다. 따라서 $X_L/X_C$를 10배 이상의 값으로 설계하여 계통주파수가 공진주파수가 되지 않게 하는 방법이 가장 직관적이다. 그래서 대표적으로 커패시턴스(C)성분을 추가 하여 계통 충전용량($X_C$)을 인위적으로 더 감소시키거나 PT의 포화전압을 높임으로써 인덕턴스(L)성분을 선형적으로 개선하여 포화에 의한 자기용량($X_L$)의 하락을 방지하는 사전연구가 있었다.

## 제 1절 추가 커패시터 설치

첫 번째로 제시할 수 있는 방법은 그림 3.1.1과 같이 345kV M.Tr 3차측 계통에 추가적인 병렬 커패시터를 투입하여 충전용량 값을 내리는 방법이다. 이 방법은 특정한 계통이 공진영역에서 탈피할 수 있고 불

평형 충전용량의 발생이 적어서 중성점 이동에 비교적 안정적이다. 그러나 우리가 목표하는 일반적인 해결방법이 아니라 특정 계통에서 EMTP 모의를 통해 해석결과가 나올 경우에 특정한 값의 커패시터를 추가하는 해결방법이다. 따라서 일반적으로 적용 가능한 방법은 아니며 그 외의 문제점도 존재한다. 그 문제점은 병렬커패시터를 추가로 설치한 설비에 병렬로 PT등 인덕턴스 성분이 추가 된다면 다시 계통이 철공진에 취약한 영역이 될 수 있다. 그리고 케이블이나 가공 동대에 직접적으로 설치되는 설비이므로 고장에 취약한 부분이 추가적으로 생기게 되는 점 또한 고려해야 한다. 따라서 이 방법은 현장에 시범적용 했지만 더 이상 활용하지 않는 방법이다.

그림 3.1.1 345kV M.Tr 3차측에 추가된 병렬 커패시터

## 제 2절 포화전압 개선에 의한 비선형 인덕턴스 해소

PT나 CT 등에서 철심의 포화는 보호계전기나 계측기의 신뢰성을 하락시키거나 급격한 인덕턴스의 감소로 계통이 공진에 취약하게 되는 심각한 문제점을 가지고 있기 때문에 충분한 마진(margin)을 고려한 설계가 필요하다. 한전계통의 345kV, 154kV 쓰이는 계전기용 CT는 정격전류 5A, 과전류 정수 20배 그리고 2차 저항 8$\Omega$를 고려하여 $\times 8\Omega \times 20 = 800\,V$의 포화전압을 설계기준으로 삼았다. CT의 보호구간이 아닌 외부고장 시 근단 고장이라 하더라도 과전류정수 20배는 매우 큰 값이며 디지털보호계전기로 99% 이상 교체된 한전 계통에서 2차측 저항이 1$\Omega$도 되지 않는 상황을 고려한다면 포화전압 800V는 상당히 큰 마진(margin)을 보장하며 포화에 대해 안정성을 보인다.

같은 철심을 쓰는 계측장비라도 PT의 포화에 대해서는 비교적 관심이 적었다. 통상 계측기(CT, PT)의 포화는 과전류나 과전압을 측정할 때 오류가 생길 경우 큰 부작용을 초래하나 고장 시 과전류와 저전압의 상황이 주로 발생하므로 PT포화는 자주 접할 수 있는 현상이 아니고 개선 필요성이 없어보였다. 그러나 고장이 아닌 다른 이유로 과전압이 발생하여 PT가 포화되고 비선형적인 인덕턴스가 발생하면 자기용량이 매우 낮아지며 계통의 정전용량과 함께 철공진을 발생시키는 큰 문제가 생기는 경우가 있어 PT의 포화에 대해서도 다시 연구하는 계기가 되었다.

PT의 포화전압은 계통이 직접접지인 곳과 비접지인 곳에 다르게 적용될 필요성이 있다. 그 이유는 앞에서 살펴본 것과 같이 직접접지 계통

은 중성점 이동이 거의 없기 때문에 불평형 전압이 발생하기 어려워 어느 경우에도 정격전압보다 높은 과전압이 발생하는 경우는 드물다. 그러나 비접지 계통에서는 중성점이 이동하기 때문에 개폐기의 비동기 투입과 개방, 외부의 지락고장, 불평형 충전전류 등의 다양한 이유로 인해서 중성점 이동에 의한 과전압이 비교적 쉽게 일어나서 정격전압보다 커지는 경우가 많다. 이러한 차이점에도 불구하고 한전의 345kV M.TR 3차측 비접지 GPT의 포화전압을 기존의 접지용 PT의 포화전압인 정격전압의 1.5배를 사용한 경우가 굉장히 많았다. 이는 위에서 밝혔던 CT포화현상에 비해 PT포화현상에 대한 관심이 비교적 적었기 때문이다. 이 때문에 345kV M.Tr 3차측 비접지 GPT에서 측정된 PT의 영상전압이 상시 높게 나타나는 곳이나 개폐장치의 투입과 개방과 같은 과도현상이 발생하는 구간에서 철공진이 발생하는 사례가 2009년에만 5건이나 발생하였다.

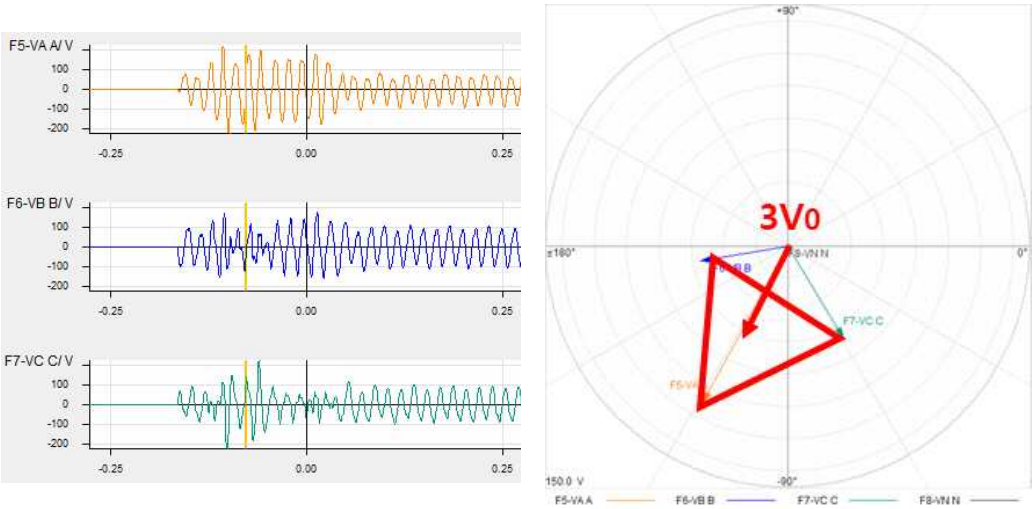



그림 3.2.1 상시 영상과전압 발생

그림 3.2.1과 같이 상시 불평형 전압이 발생하는 계통이나 철공진이 발생한 5건의 계통에 설치된 PT 모두 포화전압이 정격전압의 1.5배로 조사되었기에 비접지용 PT의 포화전압을 상향시키는 연구가 반드시 필요했다.

345kV M.TR 3차측 비접지 GPT의 포화전압을 개선하기 위해서 다음과 같은 단계를 밟았다.

1) GPT 포화전압 측정
2) 그 외 계통정수(충전용량, 변압기 임피던스) 측정
3) EMTP Modeling 설계 및 검증
4) EMTP Modeling을 이용한 결론
5) 현장적용

### 1) GPT 포화전압 측정

문제를 해결하는데 가장 핵심은 현장의 계통정수를 반영하여 EMTP Modeling을 하는 것이다. 이 때 기존 PT의 포화전압 값이 철공진을 일으키는 가장 큰 원인이기 때문에 GPT의 포화전압은 설계 값이 아닌 측정값을 사용하여야 하기 때문에 새롭게 측정하였다. 측정 대상은 5개 변전소의 12개 GPT이며 권선비, 부담, 과전압정수 등 그림 3.2.2의 GPT 명판에 나타낸 것과 같다.

그림 3.2.2 345kV M.Tr 3차측 GPT 명판

포화전압의 측정은 2차측 정격전압인 110V에서 이루어졌다. 그 결과 설계상 포화전압은 165V(1.5 )를 가져야하지만 92.8V~118.1V(0.84 $V_n$~ 1.07 $V_n$)의 값이 측정되었다. 이는 설계 오차, 측정 오차, 장기간 사용으로 인한 철심 열화 등의 다양한 사유를 고려하더라도 상당히 낮은 수준이다. EMTP Modeling을 위한 PT 포화전압 값은 측정값 중 가장 큰 값인 118V(1.07 $V_n$)를 사용하였다.

### 2) 계통정수(충전용량, 변압기 임피던스) 측정

EMTP Modeling을 위해 두 번째로 중요한 계통정수는 충전용량이다. 충전용량은 345kV M.Tr 3차측 케이블과 모선 그리고 M.TR, GPT의 외함-대지 간 충전용량이 존재한다. EMTP Modeling의 정확도를 위해

서는 모든 계통정수의 측정값을 반영하여야 하지만 본 사전연구에서는 표 3.2.1과 같이 345kV M.Tr 3차측 모선 충전용량을 1000pF으로 고정하고 옥외철구 AL동대의 충전용량을 5,000~17,500pF으로 전력케이블의 충전용량을 20,000pF ~ 80,000pF으로 설계 값을 사용하였다. 그 외 M.Tr, PT 외함-대지 간 충전용량은 생략되었다.

표 3.2.1 345kV M.Tr 3차측 충전용량

| 3차측 케이블 충전용량 | | 변압기 모선 충전용량 | 합 계 |
|---|---|---|---|
| 옥외철구 AL동대 | 5,000~17,500 [pF] | 1,000 [pF] | 6,000~18,500[pF] |
| 전력 케이블 | 20,000~80,000 [pF] | | 21,000~81,000[pF] |

### 3) EMTP Modeling 설계 및 검증

EMTP Modeling 프로그램은 ATP-Draw를 사용하였으며 기본적인 계통정수와 GPT측정값과 케이블 등 충전용량을 반영하였다. 철공진이 일어나는 Trigger 요소로는 비동기 투입과 외부지락고장과 같은 장치를 사용하지 않고 개폐장치의 투입 시 발생하는 개폐서지를 이용하였다.

EMTP Modeling은 설계파형과 실제파형을 비교함으로써 Modeling의 신뢰성을 검증하는 과정이 있어야 한다. 따라서 그림3.2.1에 나타난 포화전압 1.5 이 적용된 GPT에서의 실제 중성점이동과 함께 철공진이 발생하는 파형과 아래의 그림 3.2.3에 나타난 EMTP Modeling을 통한

과도현상의 파형을 비교했을 때 중성점이 이동하는 동일한 파형을 나타냄을 알 수 있다.(그림 3.2.1과 비교)

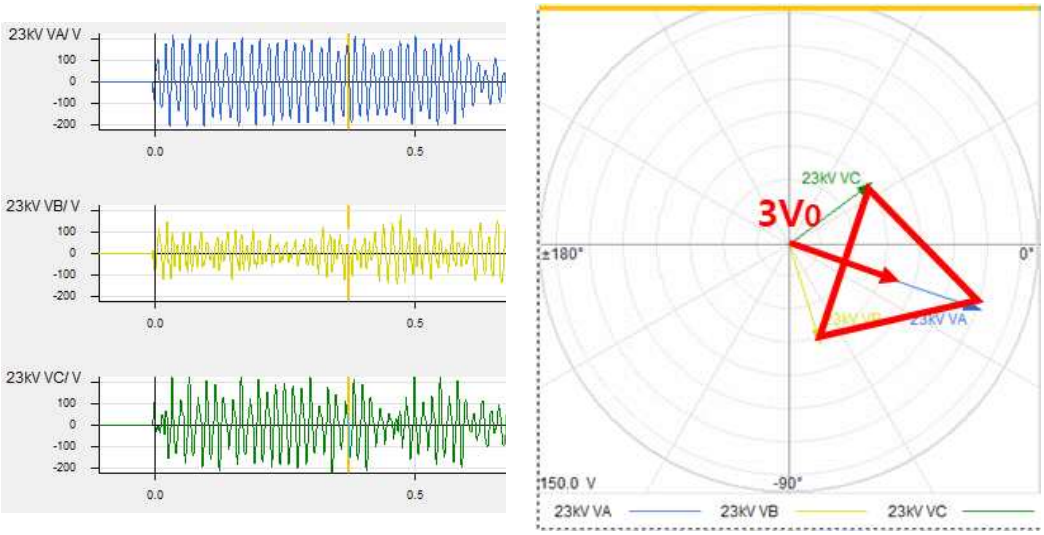



그림 3.2.3 EMTP Modeling을 통한 중성점 이동 파형

### 4) EMTP Modeling을 이용한 결론

본 사전연구는 낮은 포화전압 특성을 가진 GPT의 비선형적인 자기용량(  )과 계통의 충전용량($X$)에 의한 철공진 발생에 대한 연구이다. 따라서 GPT의 포화전압과 계통의 충전용량을 변수로 두어 다양한 조건에서 중성점 이동과 철공진 발생에 대한 결과를 도출해냈다. 계통의 충전용량은 위에서 설정한 것과 같이 6,000pF~81,000pF으로 두었으며 GPT 포화전압은 1.5$V_n$, .7$V_n$, 1.8$V_n$, 1.9$V_n$ 총 4가지의 경우를 고려하였다. 그 결과 중성점 이동에 대한 결과는 표 3.2.2과 같다.

표 3.2.2 GPT 포화전압과 계통충전용량에 따른 중성점 이동

<table>
<tr><th rowspan="2">운전영역</th><th rowspan="2">M.Tr 3차 케이블<br>+ 모선 충전용량(pF)</th><th colspan="4">GPT 포화전압(Vn)</th></tr>
<tr><th>1.5</th><th>1.7</th><th>1.8</th><th>1.9</th></tr>
<tr><td rowspan="10"></td><td>1760</td><td rowspan="9">중성점<br>반전</td><td rowspan="6">중성점<br>진동</td><td rowspan="2">중성점<br>진동</td><td rowspan="18">안정</td></tr>
<tr><td>1770</td></tr>
<tr><td>2000</td><td rowspan="2">발생</td></tr>
<tr><td>3000</td></tr>
<tr><td>3850</td><td rowspan="13">안정</td></tr>
<tr><td>3860</td><td rowspan="3">영상전압<br>발생</td></tr>
<tr><td>4770</td></tr>
<tr><td>4780</td></tr>
<tr><td>5000</td><td rowspan="12">안정</td></tr>
<tr><td rowspan="10">옥외철구<br>동대<br>운전영역</td><td>6000</td></tr>
<tr><td>8000</td></tr>
<tr><td>9000</td><td rowspan="8">중성점<br>진동</td></tr>
<tr><td>9700</td></tr>
<tr><td>9710</td></tr>
<tr><td>13000</td></tr>
<tr><td>13500</td></tr>
<tr><td>16000</td></tr>
<tr><td>17830</td></tr>
<tr><td>17840</td></tr>
<tr><td>18500</td></tr>
<tr><td rowspan="8">케이블<br>운전영역</td><td>21000</td></tr>
<tr><td>26000</td></tr>
<tr><td>31000</td><td rowspan="4">영상전압<br>발생</td></tr>
<tr><td>39460</td></tr>
<tr><td>39470</td></tr>
<tr><td>46000</td></tr>
<tr><td>51000</td></tr>
<tr><td>67930</td><td rowspan="4">안정</td></tr>
<tr><td>67940</td></tr>
<tr><td>76000</td></tr>
<tr><td>81000</td></tr>
</table>

표 3.2.2 을 통해서 포화전압이 1.9  에서 모든 충전용량의 영역에서 영상전압의 발생이나 중성점의 진동현상이 발생하지 않고 안정적인 영역에서 운전이 가능함을 알 수 있다. 이 연구를 통해서 기존의 GPT 구매규격을 개선하여 포화전압(여자특성)을 $.9V_n$으로 규정하며 일부 현장에 적용하고 있다.

## 제 3절 선행연구의 한계

사전연구를 통해서 낮은 포화전압 특성을 가진 GPT 인덕턴스 비선형성이 철공진을 일으키는 원인을 밝혀냈고 포화전압이 높은 GPT를 도입하는 것으로 그 해결책을 제시하였다. 이러한 노력에도 불구하고 345kV M.Tr 3차측 GPT의 철공진은 여전히 매년 꾸준히 발생되며 보고되고 있다. 가장 확실한 해결방법은 GPT의 포화전압을 매우 높임으로써 인덕턴스의 선형성을 확보하고 계통을 안정적인 영역에서 운전하는 것이다. 그러나 정격전압보다 1.9배 큰 포화전압을 설계하기 위해서는 큰 철심이 필요하며 이 방법은 전사에 도입하기에는 경제성을 무시한 과투자로 보이므로 적용하기 어렵다. 따라서 GPT의 포화전압이 충분하다는 전제하에 철공진을 일으키는 다른 요소에서 그 원인과 해결방법을 찾는 연구가 필요하다.

# 제 4 장 불평형 충전용량에 의한 철공진 발생

앞의 장에서는 철공진이 발생하는 이유와 다양한 원인에 대해서 알아보았다. 그리고 사전연구를 통해서 철공진의 발생원인을 해소하기 위한 다양한 해결방법과 그 한계에 대해서 알아보았다. 본 장에서는 기존연구에서 다루지 않은 계통의 불평형 충전용량이 철공진에 미치는 영향에 대해서 연구하고자 한다. 먼저 불평형 충전용량으로 인해서 상시 영상전압과 개폐장치 개방 시 불평형 영상전압이 발생한 전력계통 현상에 대한 분석을 한다. 그 후 동일현상에 대한 EMTP Modeling 설계하여 검증 및 적용 할 것이다.

## 제 1절 전력계통 현상분석

### 1. 상시 불평형 충전용량에 의한 영상전압발생

본 사례에서 oo변전소 345kV M.Tr A상에 고장이 발생하여 예비 M.Tr을 M.Tr B, C상과 연결하였다. 기존의 M.Tr A, B, C상 3차측 케이블 긍장의 차이는 없었으나 예비 M.Tr은 M.Tr B, C상과 물리적으로 멀리 떨어져있기 때문에 케이블 긍장도 M.Tr B,C상에 비해서 약 50m 정도 길다. 이것을 도식화하면 그림 4.1.1과 같다. 문제는 예비M.Tr을 연결한 뒤 M.Tr 3차측 영상전압이 36V정도로 매우 높게 나타났다.

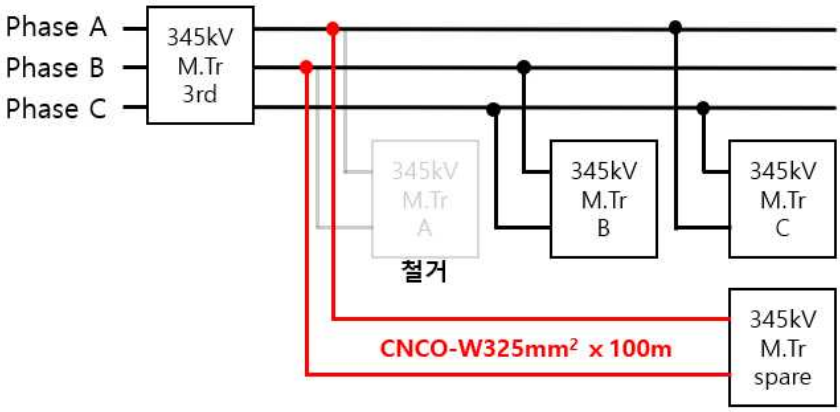



그림 4.1.1 345kV 예비변압기 설치

345kV M.Tr 3차측은 비접지 △결선이므로 3차측에 연결된 계통정수에 따라 각 상의 전압이 균형을 이룬다. 예비M.Tr을 연결하였을 경우에 그림 4.1.2와 같이 △결선 내에서  상의 충전용량이 커졌기 때문에 3차측 $A'$, $B'$상의 충전용량이 $C'$상보다 더 크다. 따라서 충전용량의 불평형으로 인해 상시 불평형 영상전압이 발생하게 된다. 사용한 케이블은 CNCO-W325 $m$이고 케이블 긍장의 차이는 약 50m이다. 이렇게 작은 케이블긍장의 차이임에도 불구하고 상시 불평형 전압이 36V정도로 매우 높게 나타난 것은 위에서 밝힌 345kV 변압기 3차측의 비접지 △결선에 의한 것으로 해석할 수 있다.

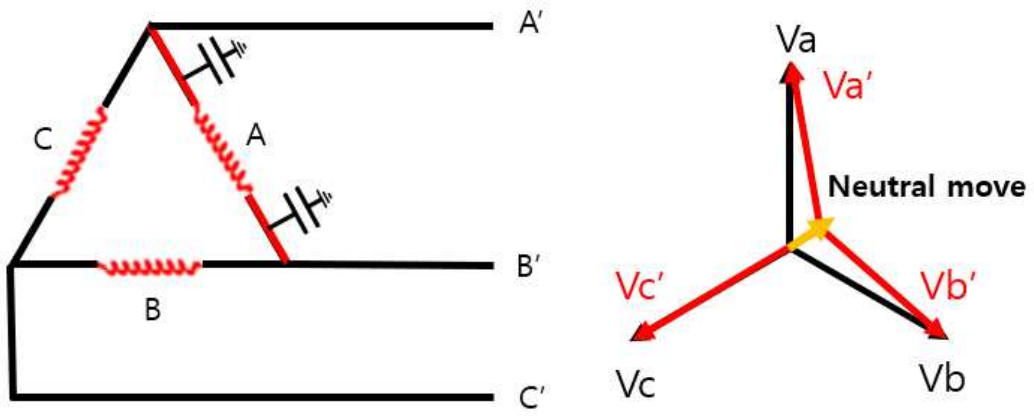



그림 4.1.2 345kV M.Tr 3차측은 비접지 △결선 영상전압 발생

앞서 GPT의 철공진을 일으키는 원인이 3차측 과전압이었으므로 본 사례에서 나타난 상시 불평형영상과전압이 철공진을 발생시키는 영향을 미치는지 연구할 필요가 있으며 철공진과 직접적인 관계가 없더라도 3차측 영상과전압 보호계전기(64V)가 상시 동작하는 상황이나 설비운영상 불평형 과전압을 해소하기 위한 방법은 반드시 제시되어야 할 것이다.

## 2. 개폐장치 개방 시 불평형 충전용량에 의한 철공진

본 사례는 △△변전소 345kV M.Tr 3차측에 연결된 소내변압기 설비용 차단기가 개방될 때 비동기 개방으로 인해 A상 케이블에 방전전류가 345kV M.Tr 3차측 설비에 불평형 충전용량을 일으켰다. 불평형 충전용량으로 인해 중성점 이동과 과전압이 철공진을 일으킨 사례이다.

변압기 3차측에 연결된 소내변압기용 차단기는 동기차단기이나 상별 차단시간 차가 허용되는 범위인 5ms의 차이로 A상이 늦게 차단된 경우이다. 이 경우 A상에 불평형 충전용량으로 인한 중성점의 진동과 영상과전압이 발생한 것을 그림 4.1.3의 그림을 통해 확인 할 수 있다.

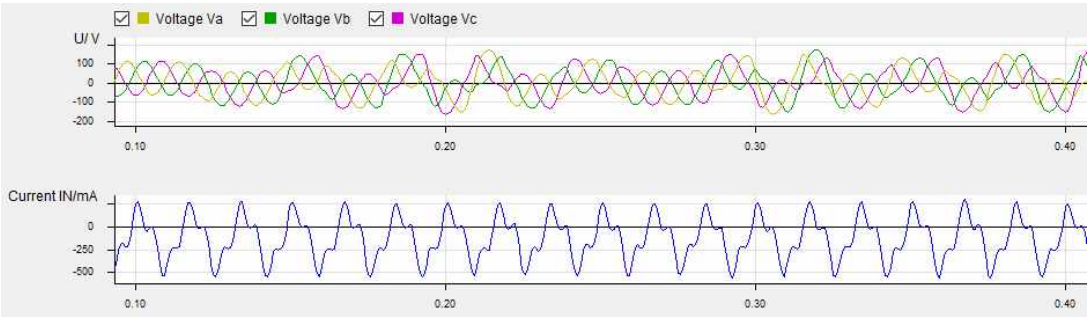



그림 4.1.3 △△변전소 345kV M.Tr 3차측 영상과전압 발생파형

일반적인 개폐서지가 아닌 비동기 차단에 의한 방전전류가 어떻게 불평형 충전용량을 가지게 되었는지 살펴보려면 345kV M.Tr 3차측 계통정수에 대한 임피던스맵과 등가회로를 이용해야한다.

그림 4.2.2는 345kV M.Tr 3차측을 등가회로 모형으로 도식화 한 것이다. 345kV M.Tr, GPT, 케이블이 가지고 있는 충전용량에 대해서 자세하게 나타내어 불평형 충전용량이 생기는 원인을 파악하였다. 그림 4.1.4에서 (a) 부분인 차단기가 비동기 개방이 되고 (b)처럼 개방부분에 120m케이블에 충전되었던 충전전류가 귀로를 형성하여 방전하게 된다. (c)에서 나타낸 것처럼 방전전류는 345kV 변압기 1-3차간 커패시턴스, 3차-대지 간 커패시턴스, GPT 1차-대지간 커패시턴스에 흐르게

된다. 이 때 A상만 투입되어있는 상태이므로 모든 상의 커패시턴스는 A상에 연결되어있는 상태이다. 따라서, A상에 큰 불평형 충전용량이 생겨서 과전압을 발생시키고 이것이 진전되어 GPT를 포화시키고 철공진을 일으키게 된다.

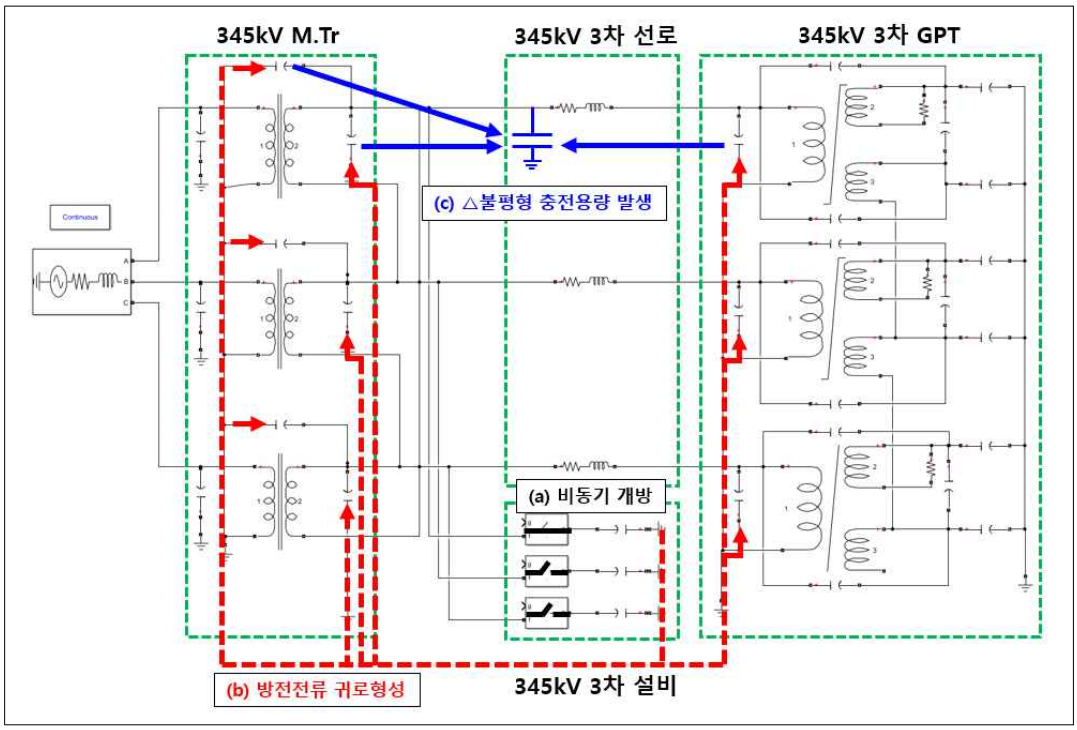



그림 4.1.4 345kV M.Tr 3차측 등가회로

## 제 2절 EMTP Modeling용 데이터 측정

4장 1절에서 살펴본 불평형 충전용량에 의한 영상과전압 및 철공진 현상을 해석하기 위해서 EMTP Modeling이 필요하다. 본 연구에서는

ATP-Draw Program을 이용하여 EMTP Modeling을 진행하였으며 EMTP Modeling의 정확도를 높이기 위해서 실계통정수 데이터를 수집, 변환하는 작업을 거쳐서 프로그램에 반영하였다. 특히, 계통 커패시턴스에 대한 실측은 매우 중요한 요소이므로 실측치를 모두 반영하였다.

### 1. 345kV BUS 및 M.TR impedance

본 연구는 345kV M.Tr 3차측 비접지 GPT 철공진에 대한 연구이므로 345kV 변압기 및 관련 계통정수를 반영하여야 한다. 345kV BUS Impedance는 SIEMENS사의 PSSE(Power System Simulation for Engineering)를 이용하였다. PSSE는 전력계통 현상분석프로그램으로 고장모의나 BUS Source Impedance 등을 구하는데 쓰인다. M.Tr 외함의 커패시턴스를 측정하기 위해서는 M.Tr 휴전이 동반되어야 하기 때문에 M.TR 내부 임피던스도 동일한 시점에 측정하여 이를 이용하였다.

### 2. GPT 여자특성 측정 및 변환

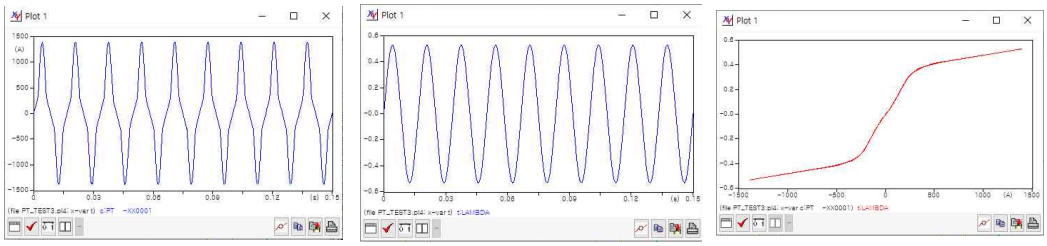
GPT는 포화전압 정격전압의 1.9배인 개선품이 적용된 곳이지만 실측을 통해서 정확한 포화전압을 측정할 필요가 있다. 포화전압은 설계 시 오차, 운전 간 열화 등의 이유로 설계 값과 측정값에 차이가 있을 수 있다. 측정결과 기존의 GPT의 각 상의 포화전압은 표 4.2.1과 같이 나타났다. 이 값들은 GPT 2,3차 측을 측정하였으며 1-2-3차 측 권수비는

13,200kV : 190/ : 190/3이므로 2차측 정격전압은 110V, 3차측 정격전압은 63.5V이다.

표 4.2.1 GPT 포화전압 측정결과

| 설비 | 상 | 2차 포화전압 | 3차 포화전압 | 정격전압 배수 |
|---|---|---|---|---|
| △ △ 변전소 GPT | A | 94.3 | 163.6 | 1.49 |
| | B | 91.1 | 157.9 | 1.44 $V_n$ |
| | C | 99.4 | 172.8 | 1.57 $V_n$ |
| | A | 97.7 | 170.2 | 1.55 $V_n$ |
| | B | 104.3 | 180.7 | 1.64 $V_n$ |
| | C | 107.7 | 186.8 | 1.70 $V_n$ |

측정결과 2차측 권선을 기준으로 설계치인 209V(1.9 $V_n$)미치지 못하는 값이 나왔으며 157.9V~186.8V(약 1.5 $V_n$ 1.7 $V_n$)의 분포를 보인다. 이는 앞에서 밝힌 설계 시 오차와 운전기간 중 열화로 인한 결과로 보인다. 포화전압의 측정은 무부하상태에서 전압을 인가하여 여자전류의 출력을 측정하기 때문에 V-i곡선으로 나타난다. 그러나 ATP-Draw Program을 포함한 EMTP 해석프로그램에서는 $\lambda$-i곡선의 각 포인트를 입력하여 주어야하므로 $\lambda$ to V 변환을 해야 한다. 변환을 위해서는 $\lambda =$ $Vdt$관계식을 토대로 ATP-Draw에서 적분기를 설계하여 $\lambda$를 V로 변화한다. 그림 4.2.1은 변환된 $i(t)$, $\lambda(t)$, $\lambda$-i곡선을 각각 나타낸다.



(a) $(t)$ (b) $\lambda(t)$ (c) $\lambda-$i곡선

그림4.2.1 포화전압측정 데이터

마지막으로 ATP Draw에 입력하기 위해 $\lambda-$i곡선의 각 포인트를 추출하여야 하므로 곡선의 포인트를 excel 변환하여 주는 프로그램인 PQDiffractor Program’을 이용한다.

## 3. 계통 충전용량 측정 및 변환

본 연구에서 철공진에 영향을 미친다고 판단하여 반드시 측정값을 반영해야 하는 것이 345kV M.Tr 3차측 계통 충전용량이다. 345kV M.Tr 3차측 계통의 임피던스맵과 등가회로를 그릴 때 포함된 충전용량은 ①345kV M.Tr 1차-3차간 ②3차-대지 간 ③GPT 1차-대지간 ④케이블 충전용량 등 크게 4가지의 커패시턴스이다. 이 중 M.Tr, GPT의 커패시턴스는 Doble사의 절연열화 진단장치로 측정하였으며 케이블 커패시턴스는 실측이 어려우므로 ATP-Draw Program 내 케이블 시스템 해석프로그램을 이용하여 적정 모델을 설계하였다.

Doble사의 절연열화 진단장치로 측정한 345kV M.Tr 및 3차측 GPT의 충전용량의 결과값은 그림 4.2.2와 같다. 예전에는 각각의 커패시턴스를 측정하고 그 값을 6차방정식을 이용하여 해를 구해서 상-간(phase to phase), 상-대지 간(phase to ground) 값을 구했으나 도블사의 진단장비 및 프로그램이 설비를 2회 측정 및 계산하여 상-간(phase to phase), 상-대지 간(phase to ground)을 값을 자동적으로 제시해준다. A, B, C 각 상의 1-3차간, 3차-대지간 값이 거의 동일한지 체크하고 2번의 측정값의 평균을 이용하여 측정값의 신뢰도를 높였다. GPT도 동일한 방법으로 측정하여 정리하면 표 4.2.2와 같다.

표 4.2.2 345kV M.Tr 및 3차측 GPT 충전용량

단위 : pF

| | CH | CT | CHT |
|---|---|---|---|
| MTr A상 | 3650.1 | 4118.5 | 7777.6 |
| MTr B상 | 3646.5 | 4165.1 | 7824.1 |
| MTr C상 | 3606.1 | 4232.8 | 7848.6 |

| | Cp | Cs | Ct | Cps | Cpt | Cst |
|---|---|---|---|---|---|---|
| GPT A상 | 158.1 | 520.1 | 54.4 | 14.9 | 71.2 | 835 |
| GPT B상 | 157.2 | 514.2 | 52.4 | 15.3 | 74.2 | 866 |
| GPT C상 | 161.2 | 512.4 | 53.3 | 14.6 | 73.1 | 851 |

모든 값을 반영하여야 EMTP Modeling의 신뢰도가 높아지지만 상대적으로 M.Tr의 충전용량보다 GPT의 충전용량이 많이 작고 Cs, Ct 등 GPT 1차와 관련이 없는 충전용량은 Modeling 결과값에 큰 영향을 미

치지 않기에 설계 시 생략하였다.

케이블 충전용량의 측정은 ATP-Draw내에서 제공되는 케이블 시스템 해석프로그램을 이용하였다. 345kV 3차측에 쓰인 CNCV-325 $m$의 core, sheath, 상간(phase to phase), 상-대지 간(phase to ground) 거리 등을 입력하면 저항, 인덕턴스, 커패시턴스를 모두 포함한 계통정수가 계산된다. ATP-Draw에서 제공되는 프로그램이므로 계산된 값을 EMTP Model에 다시 입력할 필요 없이 사용할 수 있다. 또한 현재 한전에서는 신규 지중케이블 설치 시 현장에서 2회 측정 후 결과값의 오차가 심할 경우 ATP-Draw 케이블 해석프로그램의 계산 값을 계통정수에 반영하고 있는 만큼 그 신뢰도도 매우 높다.

## 제 3절 EMTP Modeling 설계 검증 및 적용

### 1. EMTP Modeling 설계 검증

4장 2절에서 구한 계통 정수를 EMTP program에 입력하여 등가회로를 구성하여 4장 1절에 나오는 계통파형과 유사한지 검증하고 검증된 EMTP Modeling으로 추가적인 해석과 해소방안에 대해서 알아보겠다.

계통 정수를 반영한 EMTP Modeling은 그림 4.3.1과 같다. 4장 2절에서 구한 실측값, 프로그램 계산 값을 반영하였다.

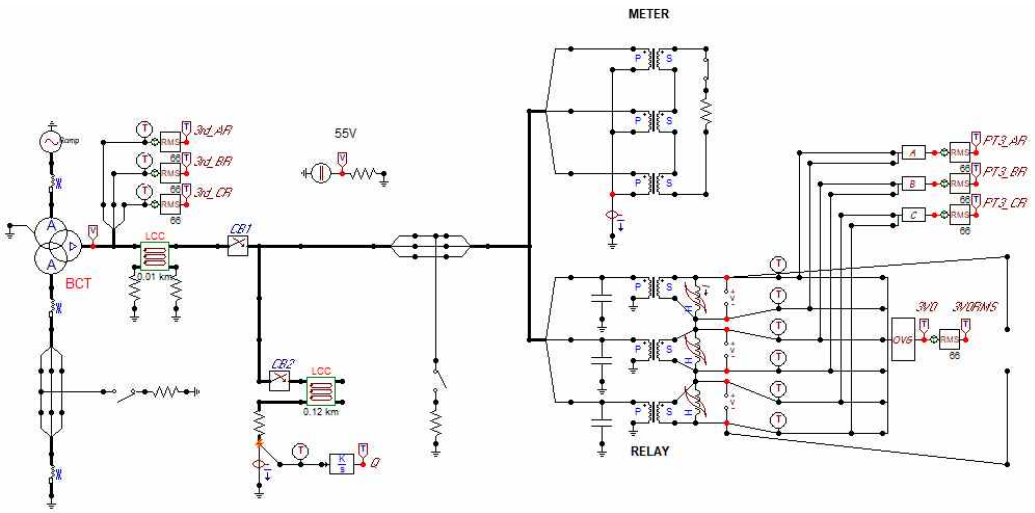



그림 4.3.1 EMTP Modeling

개폐장치는 동기개방 기준에 맞는 지연시간 5ms로 A상을 타상에 비해서 늦게 개방하였다. 그 결과 실계통에서 중성점진동과 과전압으로 발생하는 철공진현상 파형과 매우 유사한 파형을 그림 4.3.2와 같이 구할 수 있었다.

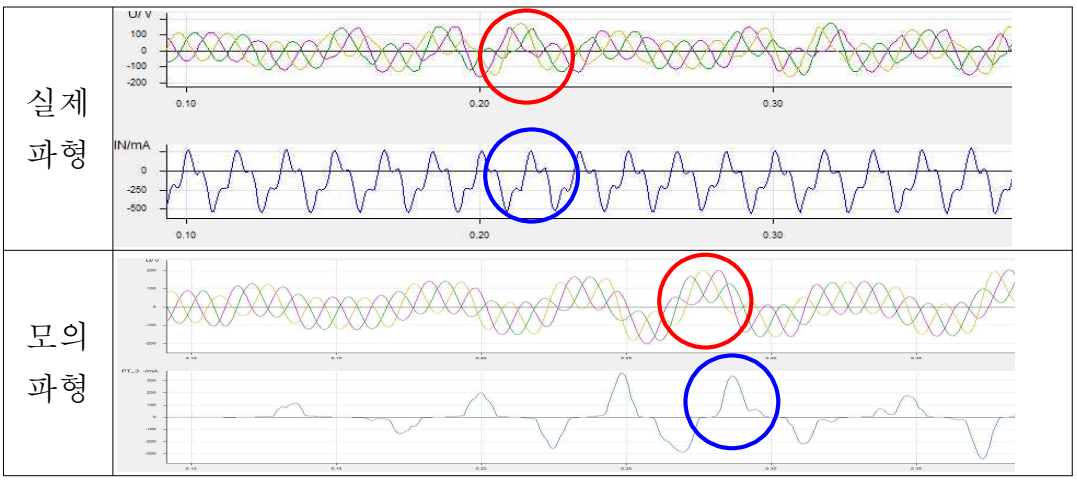
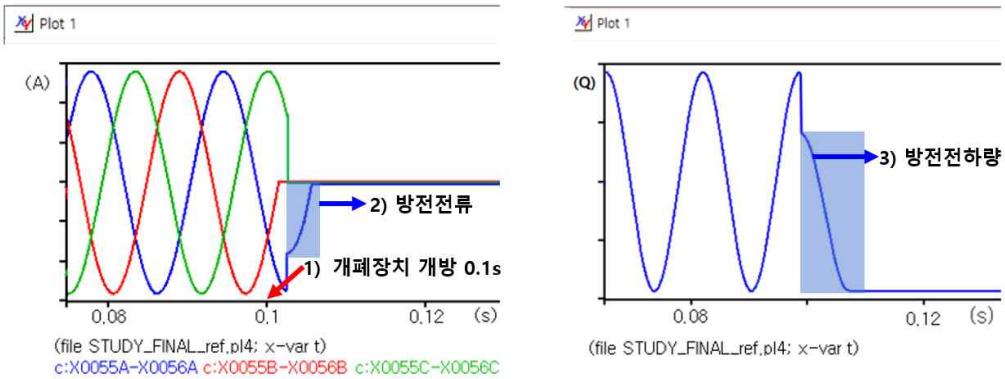



그림 4.3.2 불평형 충전용량에 의한 중성점이동과 과전압현상 파형




a) 방전전류 b) 방전전하량

그림 4.3.3 방전전류 및 방전전하량

그림 4.3.3과 같이 EMTP Modeling에서 측정된 방전전류를 이용하여 수식적인 해석을 할 수 있다. 불평형 충전용량으로 인한 전압상승을 계산하기 위해서 아래의 식을 이용하면 다음과 같다. 각 상의 커패시턴스가 비슷하기 때문에 A상 커패시턴스 값에 3배를 곱하여 식으로 나타내었다.

$$\int_{lose}^{open} i(t)dt \quad \text{(식 4.3.3)}$$

$$\triangle V = \frac{Q}{C_{otal}} = \frac{3.014e^{-4}[C]}{3.537e^{-8}[F]} = 8.521e^{3}[V]$$

$$C_{th} = 3 \times (C_{MTr13} + C_{MTr1G} + C_{GPT1G})$$

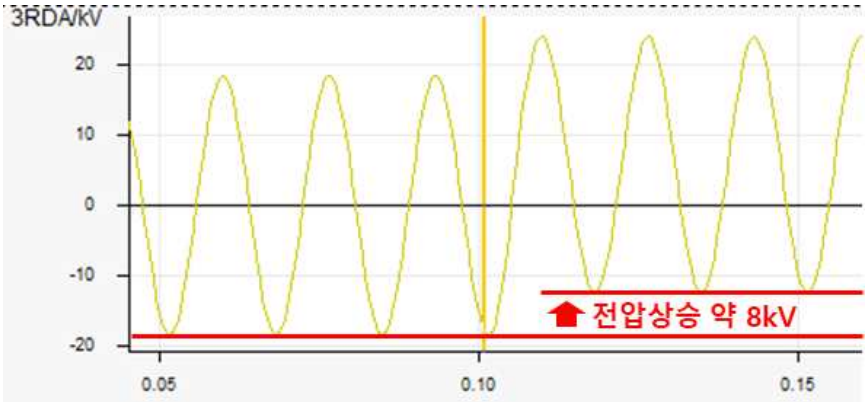


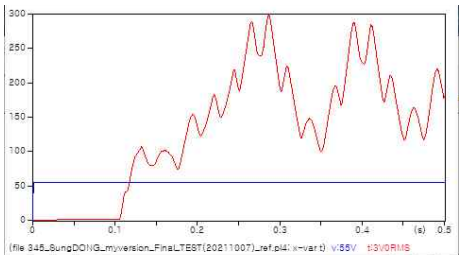

그림 4.3.4 EMTP 모의 시 영상과전압

계산치는 약 8.521kV의 상승전압을 가지며 이는 그림 4.3.4과 같이 EMTP 설계에 의한 과전압의 크기와 매우 유사한 값을 나타냄을 알 수 있다. 8.52kV의 상승전압은 정격전압의 1.64배(8.521kV/13.2kV=0.64)이므로 정격전압의 1.5~1.7배의 포화전압의 특성을 가진 GPT에서 충분히 포화 및 철공진을 일으키는 원인이 될 수 있다.

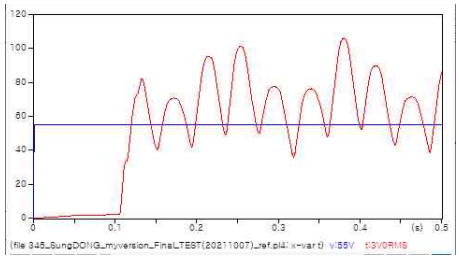
## 2. EMTP Modeling 적용

### 1) 케이블 길이에 따른 영상전압

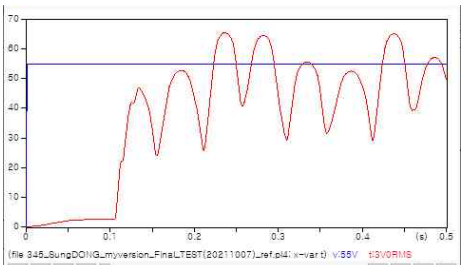
검증된 EMTP Modeling을 이용하여 케이블 길이에 따라 방전전류의 크기가 달라지고 이에 따라 영상전압 상승 값도 달라지는지 살펴보겠다.



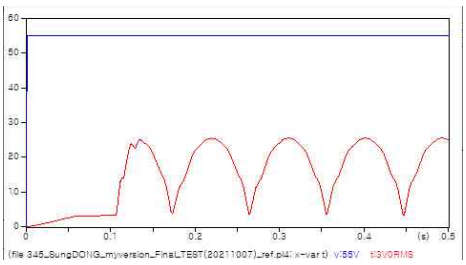
(a) 케이블 길이 : 120m



(b) 케이블 길이 : 80m



(c) 케이블 길이 : 40m



(d) 케이블 길이 : 20m

그림 4.3.5 방전케이블 길이에 따른 영상전압

위에서 살펴본 원인에 의하면 케이블의 길이가 길어질수록 방전전류가 커지고 이에 따라 영상전압도 커져야한다. 그림 4.3.5는 케이블 길이를 120m, 80m, 40m, 20m만 바꾸어서 영상전압과 철공진이 일어나는지 모의해본 결과이다. 가설에서 세운 케이블길이가 길어질수록 방전전류와 영상전압이 커지고 철공진이 일어나는 것을 볼 수 있다.

### 2) 변수 제한저항의 크기

불평형 충전용량에 의한 철공진을 방지하는 방법 중 하나는 GPT 2,3 차측에 제한저항을 연결하는 것이다. Open Delta결선인 GPT2,3차 측에 제한저항을 연결함으로써 Delta결선이 영상전류의 귀로역할을 하기

때문에 345kV M.Tr 3차측 계통의 중성점이동이 줄어든다. 문제는 제한저항의 크기가 크다면 GPT 2, 3차측에 영상전류가 잘 흐르지 않아서 철공진 방지효과가 적으며 제한저항의 크기가 너무 작다면 GPT 2, 3차측에 영상전류가 너무 많이 흘러서 과도한 순환전류가 흐를 수 있다는 점이다. 따라서 적절한 크기의 제한저항을 선정할 필요가 있으며 관련 연구에 의하면 아래의 식을 이용하여 크기를 선정할 수 있다.

$$3 \quad \frac{3\,V_s^2}{P} = \frac{3\sqrt{3}\,(63.5)^2}{200} = 104.76\Omega \quad \text{(식4.3.4)}$$

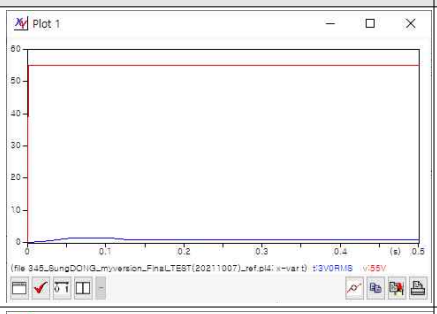
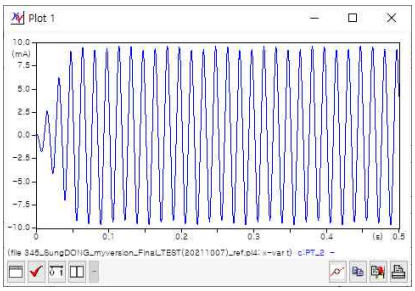
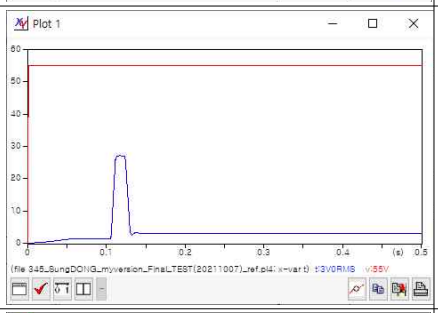
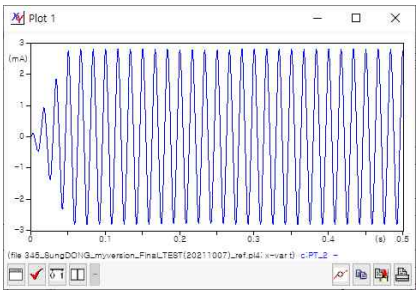
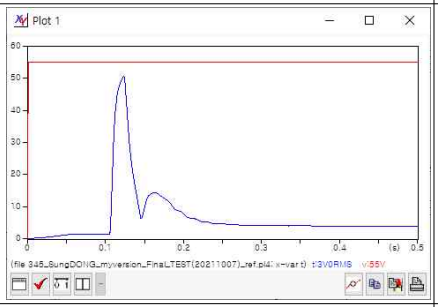
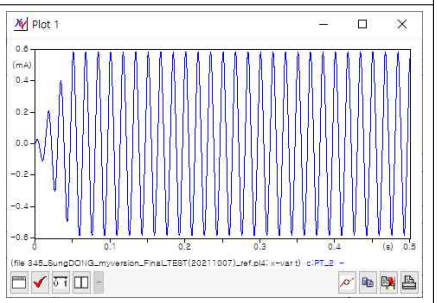
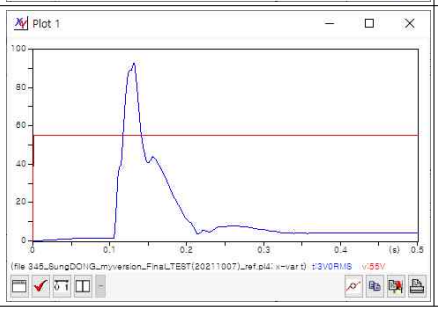
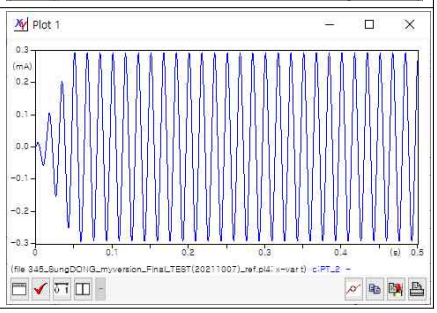
= 저항이 연결될 GPT의 정격전압[V]

$P_e$ = 저항이 연결될 PT의 정격 부담[VA]

위의 식에 의하면 제한저항의 크기는 100$\Omega$이 적절한 것으로 보이며 EMTP Modeling을 통해서 이를 검증한 것이 표 4.3.1와 표 4.3.2와 같다. 제한저항의 크기에 따른 영상전압의 크기와 OVG계전기 동작치를 넘어가는 지속시간 그리고 GPT 2,3차측의 순환전류에 대한 결과값이다. 저항이 높을수록 철공진 방지효과가 적고(영상전류 귀로 역할을 제대로 못함) 저항이 낮을수록 상시 GPT 순환전류 및 지락고장 시 큰 순환전류가 흐르기 때문에 적절한 값을 선정할 필요가 있다. 결과에서 본 것과 같이 100$\Omega$의 제한저항을 달았을 때 크기는 92.2V, 지속시간은 0.03s의 순간 과전압이 나타났다가 해소된다. 이 결과는 계전기 동작범위도 아니며 순환전류가 0.6 $A$정도로 매우 낮으므로 상시 운전 시 부

담이 되지 않는 수치이다.

표 4.3.1 제한저항의 크기에 따른 영상전압과 순환과전류 1

| 제한저항 크기[Ω] | 영상전압[V] | GPT 3차측 순환과전류[A] |
|---|---|---|
| 0 (delta 결선) |  |  |
| 10 |  |  |
| 50 |  |  |
| 100 |  |  |

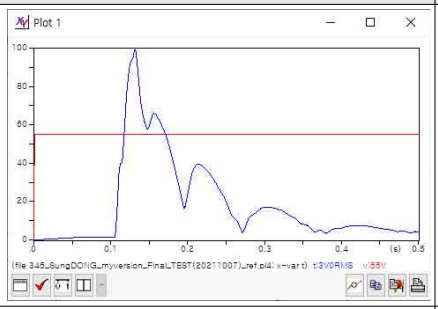
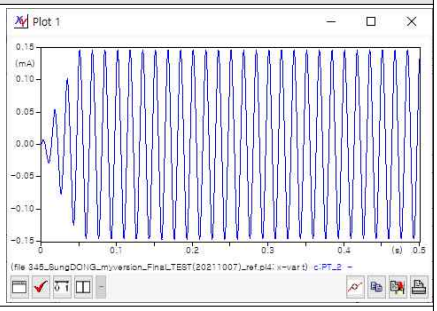
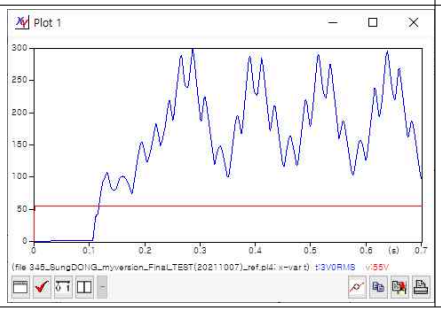
| 제한저항 크기[Ω] | 영상전압[V] | GPT 3차측 순환과전류[A] |
|---|---|---|
| 200 |  |  |
| open delta 결선 |  | 전류 없음 |

표 4.3.2 제한저항의 크기에 따른 영상전압과 순환과전류 2

| 제한저항 크기[Ω] | 영상전압 | | GPT 3차측 순환과전류[mA] |
|---|---|---|---|
| | 최대값[V] | 55V 이상 지속시간[ms] | |
| 0 | 2.9 | 0 | 9.8 |
| 10 | 27.5 | 0 | 2.9 |
| 50 | 50.2 | 0 | 0.6 |
| 100 | 92.2 | 0.03 | 0.3 |
| 200 | 99.8 | 0.08 | 0.15 |
| Open delta 결선 | 301.1 | 지속 | – |

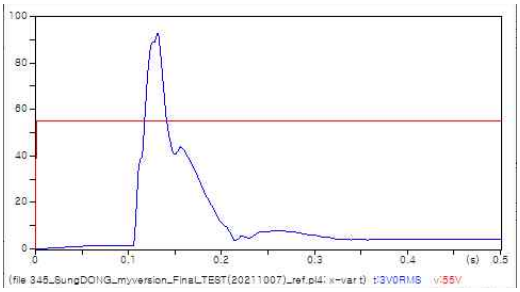
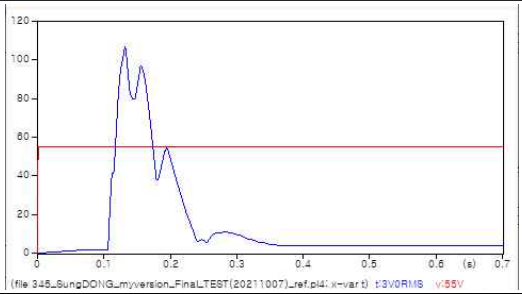
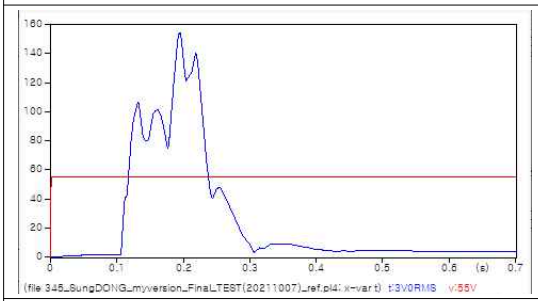
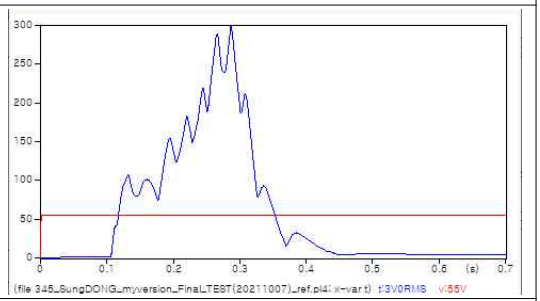
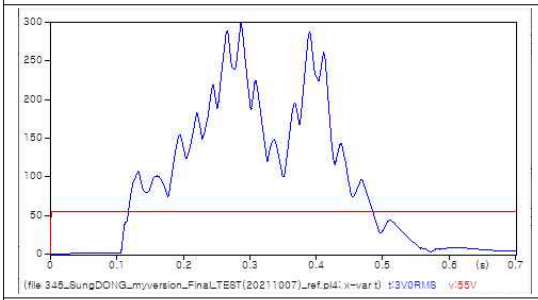
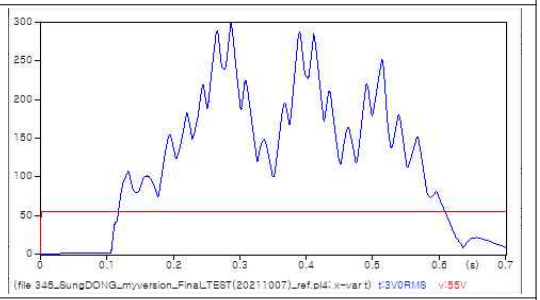
※ OVG – 영상과전압 55V이상 0.6s 지속 시 Trip, 0.1s 지속 시 Alarm

### 3) 저항투입시간

한전을 비롯한 전력설비 운용사들은 GPT 가압 시 과도현상을 억제하고 철공진을 방지하기 위해서 제한저항을 투입하는 변전소가 있다. 그러나 위의 검증을 통해서 345kV M.Tr 3차측 설비 즉, GPT가 연계된 계통에 개폐장치를 개방 할 때에도 제한저항을 설치하여야 할 필요성에 대해서 확인하였다. 개폐장치의 개방시간을 0.1s라고 할 때 제한저항의 투입시기에 따른 영상전압의 크기를 표 4.3.3에 나타내었다.

결과를 통해서 제한저항의 투입시기는 방전전류가 흐르는 순간이 적절하며 투입시간이 지연될수록 중성점 진동에 의한 영상과전압은 지속된다. 그러나 제한저항이 투입되면 바로 중성점 진동은 제한되며 영상과전압도 사라진다.

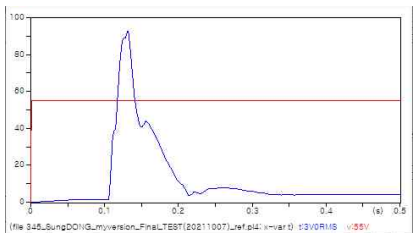
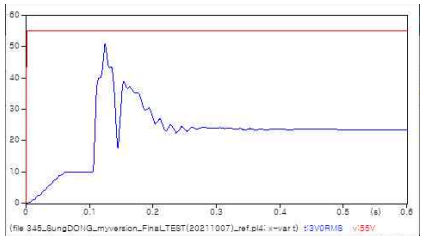
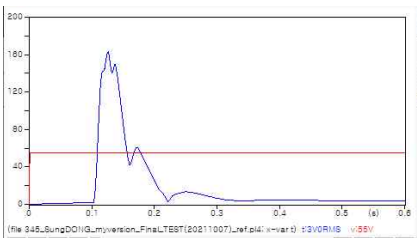
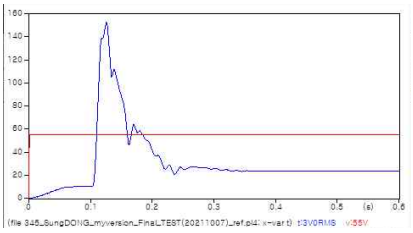
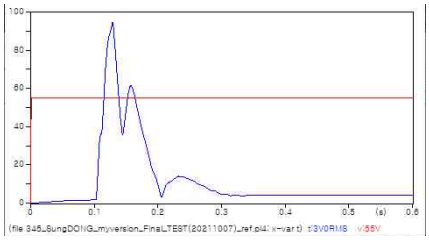
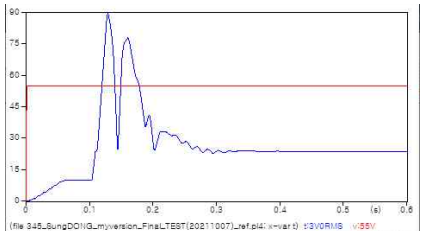
**표** 4.3.3 제한저항의 투입시기에 따른 영상전압

| | |
|---|---|
|  |  |
| 제한저항 투입시간 : 0.1s | 제한저항 투입시간 : 0.15s |
|  |  |
| 제한저항 투입시간 : 0.2s | 제한저항 투입시간 : 0.3s |
|  |  |
| 제한저항 투입시간 : 0.4s | 제한저항 투입시간 : 0.5s |

### 4) 상시 불평형 전압이 철공진에 미치는 영향

4장 1절에서 상시 불평형 충전용량으로 인해 영상전압이 발생하는 사례가 있었다. 각 상의 케이블 긍장에 차이를 두어 EMTP Modeling을 설계하여 불평형 충전용량으로 인한 영상과전압 파형을 구현할 수 있다. C상에 약 10V 정도의 상시 영상전압이 발생하고 이때 345kV M.Tr 3차측 개폐장치의 비동기 개방 시의 결과를 표 4.3.4에서 나타내었다. EMTP Modeling에서는 100Ω의 제한저항을 설치한 상태이다.

표 4.3.4 상시 영상전압 시 개폐장치 비동기 개방

| 개폐장치 투입 | 상시 영상전압 : 0V | 상시 영상전압 : 10V (C상 불평형) |
|---|---|---|
| A상 |  |  |
| B상 |  |  |
| C상 |  |  |

C상의 경우 기존 케이블 긍장차이로 인한 상시 충전용량 불평형이 있기때문에 비동기 개방에 의한 중성점 이동이 더 크게 나타나며 과전압의 크기가 더 크고 지속시간도 긴 것을 볼 수 있다. 또한 과도구간이 지났음에도 지속적인 영상과전압이 발생되어 계전기의 동작이나 설비의 절연 문제를 일으킨다.

## 제 4절 전력설비 검증 및 적용

EMTP Modeling을 통해 도출한 결과를 전력설비에 적용하고 검증하는 과정을 거치기 위해 GPT 3차측에 제한저항 설치 유무에 따라 중성점 이동을 측정 및 비교해보았다. 먼저 그림 4.4.1은 제한저항을 설치하지 않고 3차측 개폐기를 개방하였을 때의 영상과전압 계전기의 파형을 나타낸다. 최대 300 $_{eak}$의 영상전압이 측정되고 중성점 진동이 심하게 일어나는 기존의 파형과 같은 모습을 볼 수 있다.

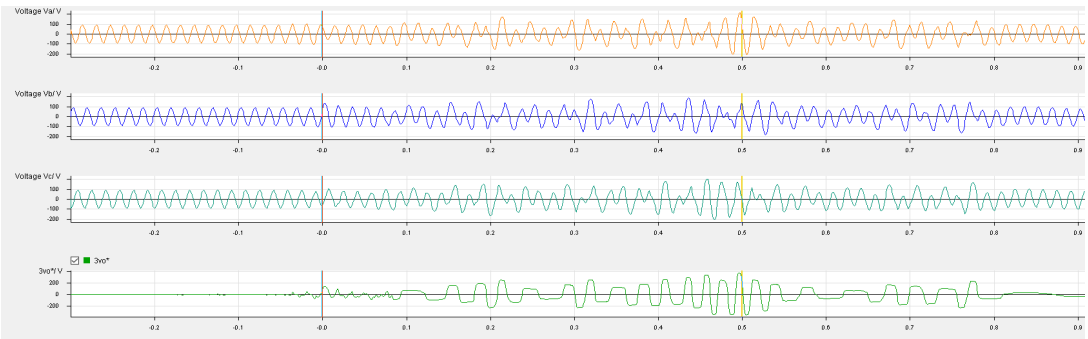



그림 4.4.1 GPT 3차측 제한저항 미설치

그림 4.4.2는 제한저항 100$\Omega$을 GPT 3차측에 설치하고 345kV M.Tr 3차측 개폐기를 개방하였을 때의 영상과전압 계전기의 파형을 나타낸다. EMTP Modeling을 통해서 도출한 결과와 같이 개폐장치 개방 시 순간적인 영상과전압이 75 $_{eak}$의 크기로 발생하지만 0.1초 이내 안정화되며 해소됨을 알 수 있다.

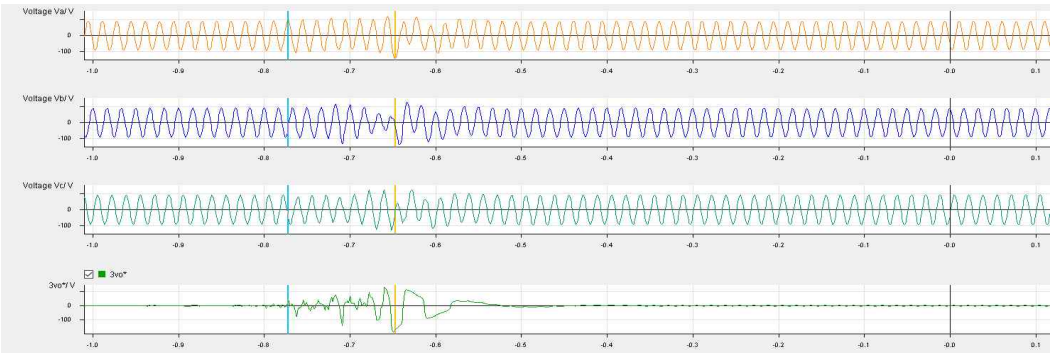



그림 4.4.2 GPT 3차측 제한저항 100$\Omega$ 설치

# 제 5 장 결론

전력계통에서 PT의 철공진을 일으키는 현상은 수많은 변수를 포함한 과도현상에 의해서 발생하기 때문에 원인이 매우 다양하며 그 해석도 매우 어렵다. 철공진을 일으키는 다양한 현상 중 본 연구에서는 불평형 충전용량에 의한 PT 철공진을 EMTP Modeling을 통해서 분석하고 발생원인을 검증하여 그 해결방법을 제시하였다.

345kV M.Tr 3차측에 설치된 비접지 GPT는 중성점 이동이 직접접지계통보다 발생하기 쉬운 조건이다. 345kV M.Tr 3차측에 연계된 개폐장치의 비동기 개방으로 인해서 방전전류가 특정한 상에 불평형 충전용량을 발생시키고 이는 중성점을 이동시켜 과전압을 일으킨다. 과전압은 그 자체로도 문제가 되지만 GPT를 포화시켜 인덕턴스를 낮추기 때문에 철공진으로 진전되어 큰 설비고장을 유발한다.

사전연구에서는 해결방법으로 포화전압을 개선한 GPT를 사용하여 인덕턴스가 낮아지는 비선형성을 해소하거나 345kV M.Tr 3차측에 병렬커패시터를 설치하여 철공진이 발생하는 조건을 방지하였다. 그러나 이번 사례를 통해서 345kV M.Tr 3차측 개폐장치 개방 시 방전전류로 인한 불평형 충전용량이 중성점이동과 과전압을 일으킬 수 있다는 것을 증명하고 개폐장치의 개방 시에도 제한저항을 설치하는 해결방법을 제시하고 현장에도 적용하여 문제점을 해결하였다. 여전히 설치하는 제한저항의 크기나 투입시기 등의 세부적인 연구가 더 필요해보이지만 현재의 연구결과를 현장에 반영 시 중성점 이동과 과전압이 완전히 해소되는 것은

연구의 신뢰도를 높여준다.

다양한 변수와 과도현상에 의한 철공진 현상에 대한 해석은 설계단계에서 계통을 EMTP Modeling하여 그 원인을 제거하는 방법이 가장 좋은 방법으로 보이나 모든 계통의 많은 변수를 설계 전 반영하여 모의하는 시도는 쉽지 않아 보인다. 따라서 계통에 일어난 철공진 사례들을 면밀히 검토하고 공통적인 문제점을 해소하는 방법을 제시하는 것이 선행되어야 하고 바람직해 보인다. 본 연구보고서에서 다뤘던 불평형 충전용량에 의한 철공진 현상에 대한 해석과 해결방법도 자주 일어날 수 있는 공통적인 문제점을 해결하는 방법 중 하나가 될 수 있을 것이다.

# 참 고 문 헌

1. 한국전력공사, 전력연구원, “345kV 변압기 3차측 지락 보호회로 종합개선”, 2010년

2. 한국전력공사, 광주전남본부 계통운영부, “커패시턴스 보상을 통한 345kV 변압기 3차측 영상전압 발생해소”, 2017년

3. 한국전력공사, 전력연구원, “전력계통에서 철공진 발생원인 및 대책” 2001년 3월

4. 윤동현, 신동열, 차한주, “과전압에 의한 변압기 철공진 분석 및 방지대책”, 2015년 11월

5. 강용철, 이병은, 정태영, 김연희, “과도상태에서 PT철공진의 해석적 분석”, 2010년 5월

6. 신동열, 정종만, 김영성, “25.8kV 지상개폐기 PT공진현상 모델링 및 대책”, 2021년 7월

7. Afshin Rezaei-Zare, “An Accurate Hysteresis Model for Ferroresonance”, 2008년 7월

8. B. Bak-Jensen, “Estimation of the Model Parameters in Equivalent Circuit Models of Potential Transformer”, 1998년

9. Joe Perez P.E, “The effects of neutral shifts on protective relays”, 1998년

10. R. F. Karlicek, “Ferroresonance of Grounded Potential Transformers on Ungrounded Power”, 1959년

11. J. Zaborszky, “Fundamental Aspects of some Switching Overvoltage on Power Systems”, 1963년

12. KEUG(한국 EMTP 사용자 그룹), “EMTP 중급자 강좌”

Abstract

# GPT Ferro-resonance analysis and prevention measures by unbalanced charging capacity

YOON SOOHWA

Department of Engineering Practice

Graduate School of Engineering Practice

Seoul National University

In the power system, ferro-resonance caused by the same or similar values of the non-linear inductance( ) of the PT and the charging capacity($X_C$) of the system is a problem that continuously occurs in the power system for various reasons and has a great adverse effect on the facilities. There has been a long and steady demand for solutions from industrial engineers.

In particular, in order to solve the cause of ferro-resonance occurring in the 345kV M.Tr tertiary GPT, a GPT with an improved saturation voltage is installed to

remove the non-linearity of the inductance (L), or an additional capacitor (C) is added to the 345kV M.Tr tertiary side. Efforts have been made to remove the system condition in which ferro-resonance occurs by installing it. However, power facility damage due to ferro resonance are still occurring, and additional causes should be analyzed and solutions should be presented.

Therefore, this report studied the effect of unbalanced charging capacity( ) on ferro-resonance, which was not dealt with in previous studies, and suggested a solution. The analyzed cases are the case of overvoltage caused by the difference in the charging capacity due to the difference in the length of the 345kV M.Tr tertiary side cable and the unbalanced charging capacity due to the discharge current during asynchronous opening of the 345kV M.Tr tertiary side circuit-breaker results in overvoltage and ferro-resonance.

Design EMTP modeling by measuring the charging capacity due to differences in cable length, which was not reflected in the previous study, and the phase to phase and

phase to ground charging capacity of power facilities (M.Tr, GPT). The reliability of EMTP modeling was inspected through the verification process of comparing the similarity between the real and simulated waveforms and comparing the magnitudes of the calculated over-voltage and the simulated over-voltage.

As a method to solve the unbalanced charge capacity caused by the asynchronous opening of the 345kV M.Tr tertiary circuir-Breaker through verified EMTP modeling, the limit resistors are installed in GPT secondary and tertiary to form a return path of the discharge current that causes the unbalanced charge capacity was presented. The effect of installing the limit resistor was simulated by considering various variables such as the size of the resistor, the input time, and the size of the discharge current, and the optimal size and input timing of the limit resistor were suggested. By applying this result to the real system, it has been demonstrated that overvoltage and ferro-resonance are resolved when the circuit-breaker is opened, and this solution will be applied company-wide.

The result of this study is that it takes a lot of time to prevent ferro-resonance through EMTP analysis before power system design, and it is expected to bring many advantages to the power industry by suggesting a method that can be applied in general by replacing the complicated method.

keywords : ferro-resonance, limit resistor, unbalanced charging capacitor, overcurrent
Student Number : 2020-22545