

과전압에 의한 변압기 철공진 분석 및 방지대책

Analysis for the Ferroresonance on the Transformer by Overvoltage and Prevention Measures

윤 동 현* · 신 동 열* · 차 한 주**
(Dong-Hyun Yun · Dong-Yeol Shin · Han-Ju Cha)

Abstract - Ferroresonance is a non-linear vibrational phenomenon that is generated by the electrical interaction of the inductance component with the capacitor component of a certain capacitance as the device of the inductance component such as a transformer is saturated due to the degradation, the waveform distortion of current and voltage, and the oscillation of overcurrent and overvoltage in a system. Recently, ferroresonance was generated from the waveform distortion of current and voltage, or the overvoltage or undervoltage phenomenon caused by the nature of an electrical power system and design technology of the transformer in the three phase transformer system. Hence, in general, ferroresonance analyzed by converting to the LC equivalent circuit. However, in general, the aforementioned analytical method only applies to the resonance phenomenon that is generated by the interaction of the capacitance of bussbar and grounding, and switching as the capacitor component with PT and the transformer as the inductance component in a system. Subsequently, the condition where ferroresonance was generated since overvoltage was supplied as line voltage to the phase voltage and thus the iron core is saturated due to the interconnection between grounded and ungrounded systems could not be analyzed when single phase PT was connected in a Δ/Y connection system. In this study, voltage swell in the configuration of grounded circuit of a step-up transformer with the $\Delta-\Delta$ connection linked to PT for control power and the ferroresonance generated by overvoltage when the line voltage of the $\Delta-\Delta$ connection was connected to the phase voltage of the grounded Y-Y connection were analyzed using PSCAD / EMTDC through the failure case of the transformer caused by ferroresonance in the system with the $\Delta-\Delta/Y-Y$ connection, and subsequently, the preventive measure of ferroresonance was proposed.

Key Words : Transformer, Ferroresonance, Overvoltage

1. 서 론

1.1 철공진 발생 현황

철공진은 계통에서 변압기가 변압기 열화, 전류와 전압의 파형 왜곡, 과전압과 과전류의 발전 등에 의해 변압기와 같은 인덕턴스 성분의 소자가 포화되어 정전용량의 커패시터 성분과 전기적 상호작용에 의해 발생하는 비선형성의 진동현상이다[1, 2]. 최근 철공진은 3상 변압기 설비에서 전력계통의 특성과 변압기 설계기술 영향으로 전류와 전압의 파형 왜곡이나 과전압과 과전류에 의해 발생된다. 이에 철공진 현상은 일반적으로 LC 등가회로로 변환하여 해석하고 있다. LC 직렬회로는 임피던스가 최소화

되어 전류 값이 최대가 되고 LC 병렬회로는 어드미턴스가 최소가 되어 전류가 최소가 되고 전압이 최대가 된다. 즉, 용량성 리액턴스는 주파수에 반비례하고 유도성 리액턴스는 주파수에 비례한다. 이 같은 방법으로 해석된 철공진 현상은 여러 가지 원인에 의해 발생되며 방지하기 위한 방안들이 제시되었다. 1) 콘덴서형 전위변성기의 경우, 내부구성이 분압 캐패시터와 권선형 전위변성기로 조합되어 있어, 분압 캐패시터의 정전용량과 전위변성기의 인덕턴스간의 전기적 상호작용으로 공진현상이 발생된다. 즉 전위변성기 내부철심의 자화특성으로 인해 일정전압에서 전위변성기가 포화되는 특성이 원인이 된다. 이에, 철공진방지장치를 PT(Potential Transformer) 2차 회로에 삽입하는 방안이 제시되었다[3]. 2) 계통에서 단상 개폐기가 상(Phase)과 상사이 또는 부하측의 상과 대지 캐패시터 사이에 연결되어 있고 1차측 비접지 Y결선 또는 Δ 결선된 부하를 가지는 변압기가 있는 접지계통으로 차단기의 동작 또는 사고에 의해서 전압이 큰 폭으로 변화하는 경우에 차단기의 그레이딩 캐패시터와 CVT(Capacitive Voltage Transformer)가 연결되어 있는 모선과 대지간 사이에 캐패시턴스를 통하여 CVT의 각 캐패시터로 지속적으로 전압이 공급되게 되는데 변압기의 비선형성 자화리액턴스 사이에서 공진이 발생하게 되면 매우 왜곡되고 고조파를 포함한 과전압이 지속

* Corresponding Author : Department of Electrical Engineering, Chungnam National University, Korea
E-mail : dhyun7585@gmail.com

* Korea Electric Power Research Institute, Korea

** Department of Electrical Engineering, Chungnam National University, Korea

Received : June 23, 2015; Accepted : October 6, 2015

적으로 발생하게 된다. 이때 CVT에 공급된 DC전압은 철심포화 원인이 되며 이를 방지하기 위하여 일반적으로 3상 개폐, 1차측 접지 Y결선 변압기 사용, Y결선 중성점 접지, 변압기 뱅크와 차단기간의 거리를 제한하는 방법을 사용하고 있다[4]. 3) 도시철도 지하 수/변전 시스템에서 철공진 현상 원인의 등가회로는 그림 1과 같으며, C1은 극간 정전용량이고 C2는 차단기와 모선의 대지간 등가 정전 용량이다. 그림 2는 그림 1의 등가회로에서 차단기 차단 시 철공진 발생과정을 나타낸 것이며 b,d 구간에서 계기용 변압기의 자속이 포화되고 과전류가 발생하는 원인이 되어, 그림 3과 같이 PT 2차측에 보조 PT를 연결하고 open delta를 구성하여 damping resistor를 연결하는 방안 등이 제시되었다[5].

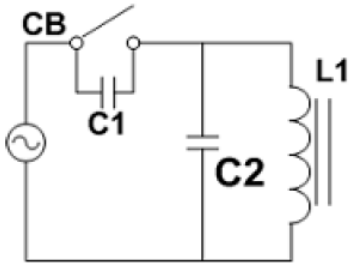


그림 1 철공진 회로
Fig. 1 Ferroresonance circuit

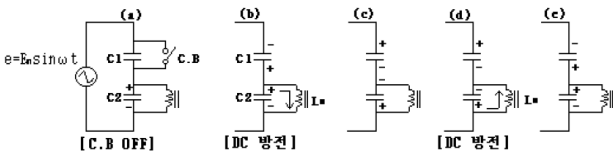


그림 2 차단기 차단 시 철공진 발생과정
Fig. 2 Ferroresonance occurred while being cut off

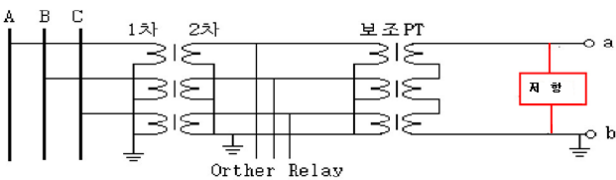


그림 3 계기용 변압기 2차 측에 보조 PT를 연결하고 open-delta를 구성하여 damping resistor를 연결한 단선도
Fig. 3 Auxiliary PT added with a damping resistor on the open-delta connection

그러나 위의 분석방법은 일반적으로 계통에서의 캐패시터 성분의 스위칭 등의 정전용량 및 인덕턴스 성분의 PT와 변압기에 의한 전기적인 상호작용으로 발생되어지는 공진현상이며, 그림 4와 같이 Δ/Y 연결된 계통에서 변압기 철공진이 발생되며, 비접지 계통과 접지계통의 연계로 상전압에 선간전압으로 과전압이 공급되어 철심이 포화되어 철공진이 발생하는 조건은 분석되지 않았다[6].

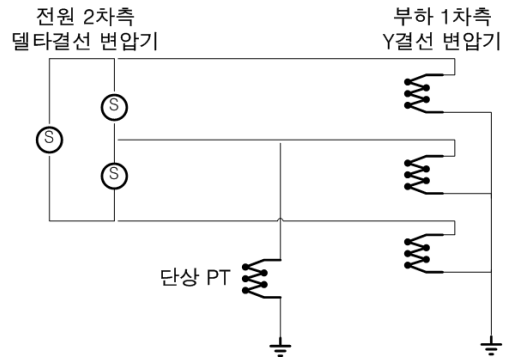


그림 4 단상 PT가 연결된 Δ/Y 계통
Fig. 4 Δ/Y system connected single phase PT

1.2 과전압에 의한 철공진 발생 원리

그림 5는 인가전압에 따라서 변압기의 인덕턴스의 자속과 전류의 특성으로 철공진이 발생하는 원인을 나타내었다. 변압기에 V_n (Normal Voltage)의 정격전압을 인가하면, L1 구간에서 1.5T의 자속이 발생된다. V_o (Over voltage)의 과전압을 인가하면, L2 구간에서 2T의 자속이 발생되도록 일반적으로 설계되어 있다. 또한, 인덕터에 전압이 인가되면 전류의 흐름에 의해 철심에서 자속이 발생되는데 전기적인 상호작용으로 자속이 캐패시터 성분이 라고 볼 수 있다[7]. 즉, 과전압에 의해 자속이 자화곡선의 L2까지 증가하게 되면 변압기의 철심은 상호인덕턴스에 의해 포화되고, 변압기 권선의 누설 인덕턴스는 그 영향이 작지만 해석이 복잡하여 일반적으로 무시되며, 인덕턴스는 매우 낮은 값으로 L2 구간에 포함된다. 이때 매우 큰 전류펄스가 발생되어 전류는 캐패시터 성분인 변압기의 자속으로 변환되는데 급격하게 증가하여 비선형 철공진 발생 원인이 된다.

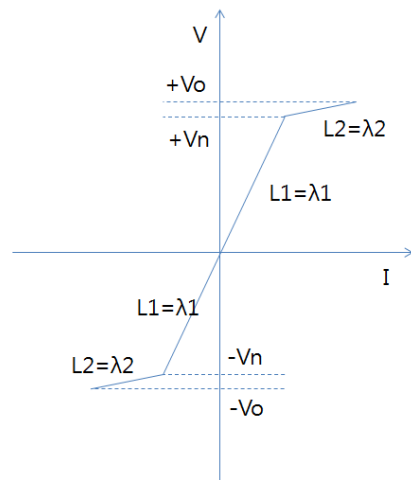


그림 5 인가전압에 따른 변압기의 인덕터 자속-전류 특성
Fig. 5 Flux-current characteristics of inductor in the transformer by input voltage

1.3 Δ-Δ/Y-Y결선 계통에서 과전압에 의한 철공진 발생으로 변압기 고장 사례

그림 6은 그림4의 일례로 접지 Y결선 변압기에 선간전압으로 과전압의 공급으로 철공진이 발생하는 변압기 고장 사례로서 Δ-Δ/Y-Y연결에 의한 계통에서 신설된 4회로 개폐기 내의 스위치 1을 on후, 스위치 2를 on한 순간 배전용 변압기에 철공진이 발생하여 2차측에 이상전압과 소음과 진동이 발생하였고, 4회로 개폐기에 내장된 제어전원용 PT(200VA)가 소손되었다.

본 연구에서는 Δ-Δ/Y-Y연결에 의한 계통에서의 철공진 발생에 의한 변압기 고장사례를 통해 제어전원용 PT가 연결된 Δ-Δ결선의 승압 변압기의 접지회로 구성으로 PT가 연결되지 않은 타상에서 전압상승과 Δ-Δ결선의 선간전압과 접지 Y-Y 결선의 상전압이 연결시 과전압에 의해 발생하는 철공진현상 원인을 PSCAD / EMTDC를 이용하여 분석하였고, 철공진 방지 방안을 제시하였다.

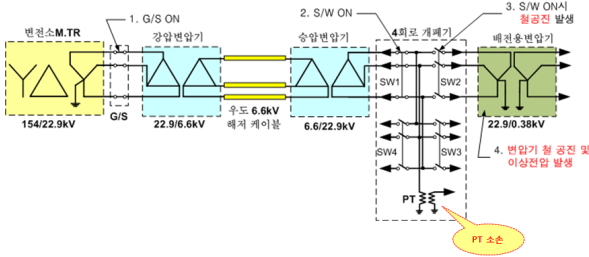


그림 6 철공진에 의한 고장 사례
Fig. 6 Failure case by ferroresonance

2. 본 론

2.1 변압기의 전압-전류 특성

2.1.1 PT(계기용 변압기)

PT는 MOF(Metering outfit) 내부에 있으며, 일반적으로 Y결선 3상에 연결되어 있다. 또한 1차권선, 코어, 2차권선의 변압기 구조이며 상과 병렬로 연결되어 있어, 계통에서의 상전압을 측정하는데 사용되지만, 본 고장사례에서는 개폐기의 제어용 전원으로 사용되었다.

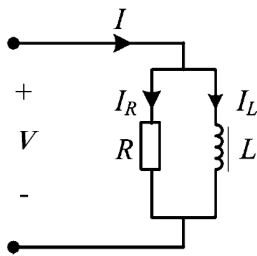


그림 7 PT의 등가회로
Fig. 7 The LC equivalent circuit of PT

로 사용되었다. PT의 방정식은 그림 7의 등가회로에 의해 식 (1)~(3)과 같이 얻어진다[8].

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (1)$$

$$I_R = \frac{P}{V} \quad (2)$$

$$I_L = \sqrt{I^2 - I_R^2} = \sqrt{I^2 - \left(\frac{P}{V}\right)^2} \quad (3)$$

여기서, P : 소모전력

2.1.2 배전용 변압기 구조

배전용 변압기로 사용되는 외철형 변압기는 5각을 구성하기 위해서 4개의 적층철심을 맞춰 구성되었고, 각 상의 권선은 안쪽에 위치한 3각에 구성된다. 따라서 인접한 철심은 동일한 공통 권선을 갖게 된다. 이 공통권선으로 인해서 3상중에 한상이나 두상이 여자 되었을 때 나머지 상에 유기전압이 발생된다. 이 유기전압은 계통의 다른 성분과 결합하여 과전압이 발생할 수 있는 가능성을 만들게 된다. 그림 5는 배전용 변압기 구조를 나타내었다.

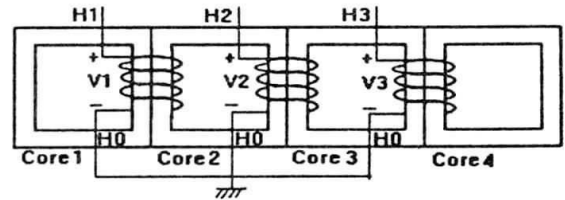


그림 8 배전용 변압기 구조
Fig. 8 Configuration of the distribution transformer

본 연구에서는 그림 8의 외철형 변압기 등가회로를 사용하였으며, 그림 9는 등가회로 구성을 위한 배전용 변압기로 사용하는 외철형 변압기의 전압과 전류의 관계식을 다음과 같다[9, 10].

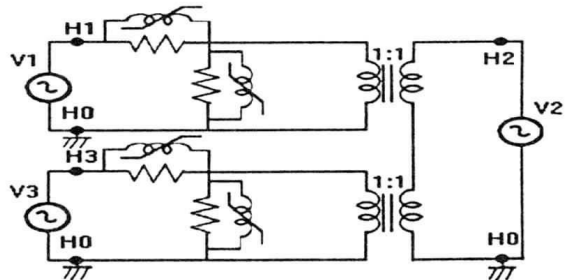


그림 9 배전용 변압기 등가회로
Fig. 9 Equivalent circuit of the distribution transformer

$$V_1 = L_1 \frac{d}{dt} I_1 + L_2 \left(\frac{d}{dt} I_1 - \frac{d}{dt} I_2 \right) \quad (4)$$

$$V_2 = L_2 \left(\frac{d}{dt} I_2 - \frac{d}{dt} I_1 \right) + L_3 \left(\frac{d}{dt} I_2 - \frac{d}{dt} I_3 \right) \quad (5)$$

$$V_3 = L_4 \frac{d}{dt} I_3 + L_3 \left(\frac{d}{dt} I_3 - \frac{d}{dt} I_2 \right) \quad (6)$$

2.1.3 배전용 변압기 자속포화 모델

국내 배전계통에서 사용되는 배전용 변압기 자속포화 모델은 계산 용이성을 위해 배전용 변압기를 단상2권선(상별) 변압기로 설정하여 그림 10과 같이 등가회로로부터 변압기 1, 2차측의 전압방정식을 구하였다[11].

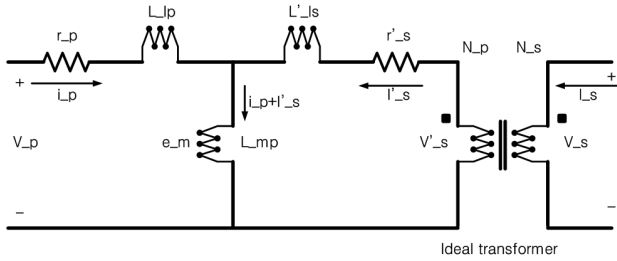


그림 10 자속포화 모델을 위한 배전용 변압기 등가회로

Fig. 10 Equivalent circuit of the distribution transformer for magnetic flux saturation model

$$V_p = i_p r_p + \frac{d\lambda_p}{dt} [V] \quad (7)$$

$$V_s = i_s r_s + \frac{d\lambda_s}{dt} [V] \quad (8)$$

여기서, i : 전류, λ : 자속, r : 저항

변압기의 1차 측에 대하여 1, 2차 측의 자속 및 전류, 상호 쇄교 자속을 구하면 식 (9)~(11)과 같다.

$$\lambda_p = L_p i_p + \lambda_m [Wb] \quad (9)$$

$$\lambda_s = L_s i_s + \lambda_m [Wb] \quad (10)$$

$$\lambda_m = L_m (i + i_s) [Wb] \quad (11)$$

여기서, λ_m : 상호 쇄교자속
 L_p, L_s : 누설인덕턴스
 L_m : 상호인덕턴스

변압기 철심의 포화 현상은 그림 11과 같이 변압기 개방회로로부터 얻은 곡선을 이용하여 모델링하고 해석방법을 도출할 수 있다. 변압기 모델에 철심의 포화 현상 해석방법은 상호리액턴스의 값을 매 계산시마다 변경하는 방법, 포화된 쇄교 자속을 해석적 함수를 이용하여 자화 전류를 근사화 하는 방법, 상호 쇄교 자속 값이 포화 되었을 때와 포화되지 않았을 때의 값의 관계를 이용하는 방법이 있으며, 본 연구에서는 참고문헌 [11]에서 제시한 상호 쇄교 자속 값 이 포화 되었을 때와 포화되지 않았을 때의 값을 관계를 이용하였다. 포화되지 않은 쇄교 자속의 식은 식

(11)를 이용하여 식 (12)과 표현할 수 있다.

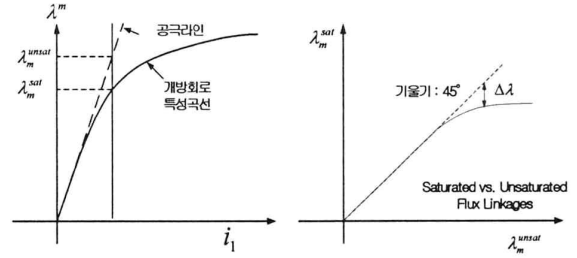


그림 11 변압기의 포화 특성 곡선

Fig. 11 Saturation curve of the transformer

$$\lambda_m^{unsat} = L_m^{unsat} (i_p + i_s') [Wb] \quad (12)$$

유사한 방법으로, 식 (9), (10)을 포화된 자속의 항을 이용하여 전류에 대해 표현하면 식 (13), (14)와 같다.

$$i_p = \frac{\lambda_1 - \lambda_m^{sat}}{L_p} [A] \quad (13)$$

$$i_s' = \frac{\lambda_s' - \lambda_m^{sat}}{L_s'} [A] \quad (14)$$

식 (13), (14)을 식 (12)에 대입하여 풀면 식 (15)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\lambda_m^{unsat}}{L_m^{unsat}} = \frac{\lambda_p - \lambda_m^{sat}}{L_p} + \frac{\lambda_s' - \lambda_m^{sat}}{L_s'} \quad (15)$$

여기서, λ_p, λ_s' : 포화된 값

λ_m^{unsat} 을 $\lambda_m^{sat} + \Delta\lambda$ 로 치환하고 λ_m^{sat} 에 대하여 정리하면, 식 (16)과 같다.

$$\lambda_m^{sat} = L_M \left(\frac{\lambda_p}{L_p} + \frac{\lambda_s'}{L_s'} - \frac{\Delta\lambda}{L_m^{unsat}} \right) [Wb] \quad (16)$$

2.2. 시뮬레이션 결과

2.2.1 배전용 변압기 포화현상 특성

앞 1.2절의 과전압에 의한 철공진 현상을 확인하기 위해서는 배전용 변압기의 자속포화 현상을 확인해야 된다. 그러나 계통고장으로 철공진 측정이 불가하여 동일한 조건으로 표 1의 파파메타와 PSCAD / EMTDC를 이용하여, 그림 12에서 입력전압을 상전압 13,200[V]와 선간전압 22,900[V]를 인가하여 포화 특성을 확인하였다. 13,200[V] 인가시 변압기는 비포화 히스테리시스 곡

선을 가지고 있으며, 전류는 약 0.0048[A], 전압은 약 13,200[V] 특성을 확인 하였다. 22,900[V] 인가시 변압기는 포화 히스테리시스 곡선을 가지고 있으며, 전류는 왜곡된 파형으로 약 0.0125[A], 전압은 약 28,000[V] 특성이 확인되었다. 또한, 전류의 파형은 부하의 용량에 따라 달라지는 것으로 확인되었다. 즉, 고장계통에 사용된 배전용 변압기는 입력전압에 따라 비포화 및 포화로 동작되며, 과전압이 인가되면 철심이 포화되어 철공진이 발생할 수 있는 것으로 확인 되었다.

표 1 배전용 변압기 규격

Table 1 Specifications of the distribution transformer

전압비 [kV]	22.9/0.4
용량 [MVA]	0.5
%임피던스 [pu]	0.04
철손 [pu]	0.002
동손 [pu]	0.01
2차측 부하 [ohm]	10

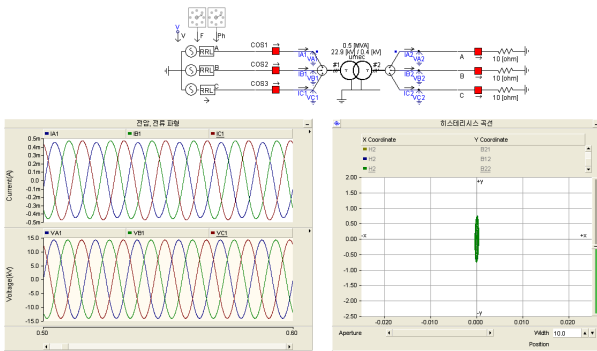
2.2.2 고장계통 시뮬레이션

그림 4에서 Δ 결선과 접지 Y결선은 그림 6의 승압변압기와 배전용 변압기로 볼 수 있다. 변압기 Δ - Δ/Y -Y 연결 계통에서 과전압으로 인한 철공진 발생 원인에 대한 위험요소 원인을 분석하기 위해, 고장계통에서 적용된 표 1, 표 2의 변압기 규격을 적용하였으며, 개폐기 제어용 스위치는 LS산전 차단기를 모델링하였고 캐패시터 성분은 철공진 영향에 미치지 않는 정전용량이며, 상별 개폐기 스위칭 시간은 동일한 조건으로 설정하였다.

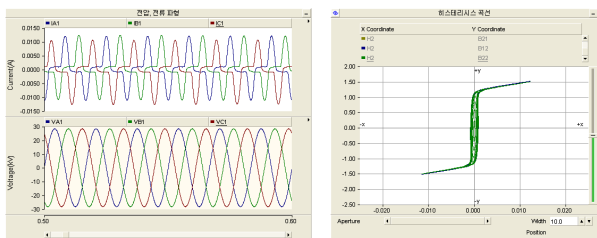
표 2 승압변압기 및 PT 규격

Table 2 Specifications of the step-up transformer and the PT

	승압용 변압기	PT
전압비 [kV]	6.6/22.9	13.2/0.23
용량 [MVA]	2	0.0002
%임피던스 [pu]	0.06	0.0142
철손 [pu]	0.002	0.002
동손 [pu]	0.01	0.01



(a) 13,200[V] 인가시 히스테리시스 곡선 (비포화)
(a) Hysteresis curve when input voltage is 13,200[V](unsaturated)



(b) 22,900[V] 인가시 히스테리시스 곡선 (포화)
(b) Hysteresis curve when input voltage is 22,900[V](saturated)

그림 12 배전용 변압기의 히스테리시스 곡선 특성

Fig. 12 Hysteresis curve characteristics of the distribution transformer

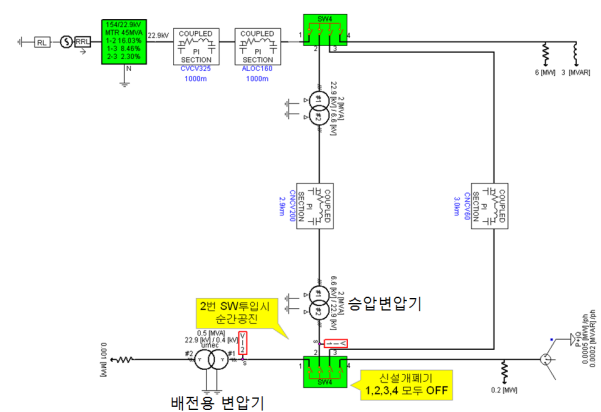


그림 13 고장 사례 계통도

Fig. 13 System diagram of failure case

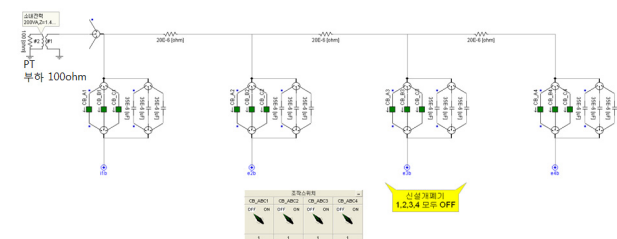


그림 14 그림 10의 신설개폐기 내부 구성

Fig. 14 Inside composition of new switch at the Fig. 10

그림 13은 그림 6을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 철공진에 의한 고장사례 계통을 시뮬레이션 하였다. 그림 14는 그림 13의 개

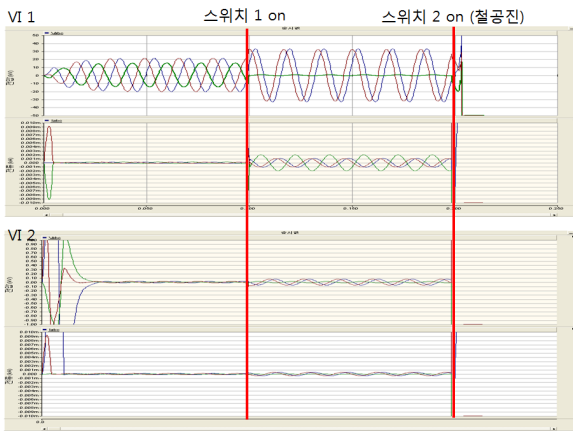


그림 15 그림 13의 Δ/Y 연결 계통에서의 승압변압기(VI1)와 배전변압기(VI2)의 전압, 전류 파형

Fig. 15 Voltage and current waveform of the step-up transformer and distribution transformer in system connected Δ/Y at the fig. 13

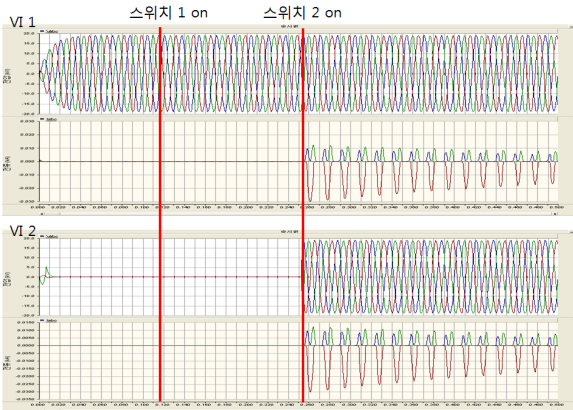


그림 16 그림 13의 변압기간 Y/Y 연결 계통에서의 승압변압기(VI1)와 배전변압기(VI2)의 전압, 전류 파형

Fig. 16 Voltage and current waveform of the step-up transformer and distribution transformer in system connected Y/Y at the fig. 13

폐기의 내부스위치 구성을 시뮬레이션 하였으며, PT는 개폐기 제어용 전원이므로 2차측에 100 ohm 부하를 사용하였다. 그림 15는 그림 13의 강/승압변압기와 배전용변압기가 Δ/Y 결선으로 VI 1은 승압변압기와 개폐기 사이의 전압과 전류 파형을 시뮬레이션 결과이며, 스위치 1 on 이전의 파형은 개폐기 제어용 스위치의 Grading 캐패시터 성분과 PT의 부하 100 ohm에 의해 B상이 전압강하 되었으며, 스위치 1 on 이후의 파형은 Δ 결선 승압변압기 B상이 접지회로로 구성되어 전압이 A상과 C상에 비해 대폭 감소하였고, 스위치 2 on 이후는 배전용 변압기에 과전압이 인가되어 철심 포화로 전압과 전류 파형이 급격하게 증가하여 철공진 현상이 발생되었다. VI 2는 개폐기와 배전용 변압기 사이의

전압과 전류 파형을 시뮬레이션 결과이다. 스위치 1 on 이전과 이후의 파형은 개폐기 제어용 스위치의 Grading 캐패시터 성분에 의해 누설된 미세한 파형이며, 스위치 2 on 이후의 전압, 전류 파형은 철공진에 의해 급격히 증가하였다.

그림 16은 그림 13의 강/승압변압기와 배전용 변압기가 Y/Y 결선으로 VI 1은 승압변압기와 개폐기 사이의 전압과 전류 파형을 시뮬레이션 결과이며, VI 2는 개폐기와 배전용 변압기 사이의 전압과 전류의 파형을 시뮬레이션 결과로써 강/승압 변압기가 접지 Y결선일 경우, PT에 의한 전압강하 및 철공진 현상이 발생하지 않은 것으로 확인 되었다.

2.3 시뮬레이션 결과 분석

2.3.1 개폐기의 제어용 스위치 1 on

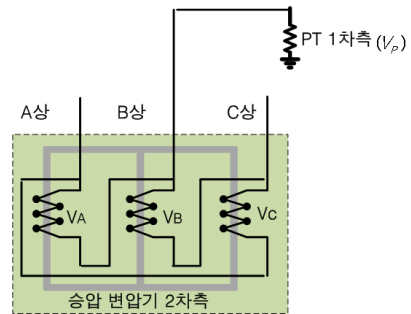


그림 17 그림 6의 스위치1 on시 비접지 승압 변압기와 PT의 연결 상태

Fig. 17 Link state between ungrounded the step-up transformer and PT when the switch is on at the fig. 6

그림 14에서의 승압변압기는 개폐기의 제어용 PT가 B상에 연결되어 있으며, 식 (1)~(3)에 의해 PT의 상전압으로 전압강하가 발생하여 Δ - Δ 결선 승압변압기 2차측 B상은 그림 17과 같이 접지회로로 구성된다. 즉, Δ 결선에서는 선간전압이 존재하고, PT는 상전압용으로 제작되어, 선간전압과 상전압의 전압차이와 전압강하로 접지회로가 구성된다.

2.3.2 개폐기의 제어용 스위치 1, 2 on

그림 18은 그림 6에서 개폐기 제어용 스위치 1이 on 되는 순간, 1) 앞절 4.1과 같이 승압용 변압기의 B상 접지회로에 의해 배전용 변압기 B상에 접지회로가 구성 되었다. 개폐기 제어용 스위치 2 on 되는 순간, 2)배전용 변압기에서 접지회로로 구성된 B상은 배전용 변압기 철심 포화에 의한 과전류가 발생되어 PT가 소손 되었으며, 3) 배전용 변압기가 PT의 과부하로 인한 B상 과전류 공급에 의해 철심과 코일의 상호작용[12]으로 식 (4)~(6)과 같이 B상의 전압이 낮아지고 A상과 C상의 자속이 B상으로 유기되면서 A상과 C상의 전압이 상승한다. 또한, 동시에 Δ - Δ 결선 승압변압기 2차측에서 선간전압(22,900[V])이 접지 Y-Y결선 배

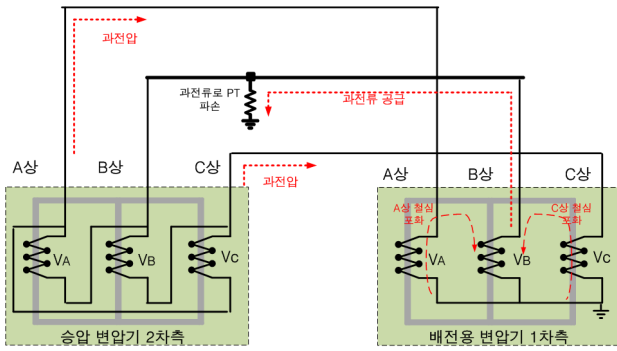


그림 18 그림 6의 스위치 1, 2 on시 비접지 승압변압기와 접지 배전용 변압기의 철심과 코일의 상호작용

Fig. 18 Reciprocal action of the coil and the iron core between the grounded distribution transformer and the ungrounded step-up transformer when the switch 1 and 2 is on at the fig. 6

전용 변압기 1차측 상전압 (13,200[V])에 공급됨으로써 과전압이 인가되어 배전용 변압기가 식 (7)~(16)과 같이 철심 포화 동작을 하게 된다. 즉, 배전용 변압기는 식 (4)~(6) 의한 B상 전압 하강으로 A상과 C상의 전압이 상승하며, 식 (7)과 같이 A상과 C상의 자속이 증가한다. 또한, A상과 C상은 과전압에 의해 식 (9)와 같이 쇄교 자속이 증가하고, 쇄교 자속이 증가는 식 (11)과 같이 전류와 인덕턴스 값이 증가한다. 이에, 식 (11)에서 쇄교 자속이 상호 인덕터의 포화점까지 커지면 식 (16)과 같이 인덕터의 임피던스가 낮아져서 매우 큰 전류가 발생되고 철심이 포화된다. 포화된 철심은 히스테리시스 특성으로 캐패시터 성분의 자속이 급격히 증가하여 철심의 단면에 작용하는 응력이 발생되어 소음과 진동을 포함한 철공진 발생된다.

2.4 철공진 방지 대책

상기 철공진의 발생원인은 접지 Y결선 배전용 변압기 앞단 강/승압변압기를 Δ 결선으로 사용했기 때문에 과전압 인가에 의해

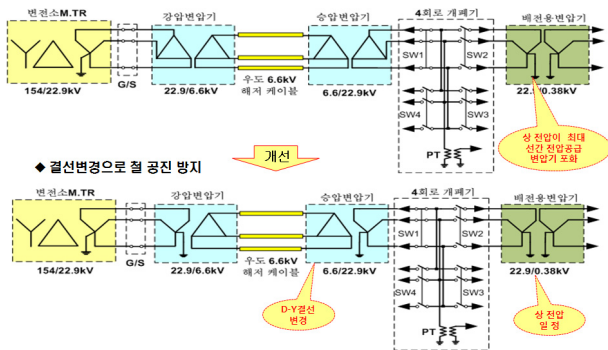


그림 19 그림 6의 Δ/Y 결선 계통에서의 철공진 방지대책

Fig. 19 Prevention measures of ferroresonance in the connected Δ/Y system at the fig. 6

배전용 변압기가 철심이 포화되어 철공진이 발생하였다. 따라서 이와 같은 현상을 방지하기 위해서는 첫 번째 방법으로는 그림 19와 같이 강압변압기 1차측과 승압 변압기 2차측을 접지 Y결선으로 교체해야 철공진을 방지할 수 있다. 그 이유는 배전용 변압기와 승압변압기의 상전압이 일정하여 PT에 전압강하가 발생하지 않아 접지회로 구성이 되지 않으며, 과전압이 인가되지 않아 철심포화가 발생되지 않아 철공진이 발생되지 않는다. 두 번째 방법은 변압기를 재설계하는 것이다. 1.2에서 설명한 바와 같이 변압기는 정격전압에서 1.5T의 자기장을 발생하는데, 정격전압의 범위를 선간전압까지 높게 설계하여 과전압이 인가되어도 철심포화가 되지 않는다면 철공진 현상을 방지할 수 있다.

3. 결 론

배전 계통에서 철공진이 발생하는 경우는 앞 1.1절에서 설명한 바와 같이 여러 가지의 경우가 있다. 특히, 철공진 분석은 인덕터 성분과 캐패시터 성분의 전기적인 상호작용으로 LC 등가회로로 변환하여 해석되고 있다. 그러나, 과전압에 의한 철공진을 분석한 연구결과 입증되지 않고 있으며, 사례를 통해 본 연구에서 선간전압에서 PT에 의한 전압강하로 접지회로 구성을 분석하였고, 강/승압변압기 Δ 결선의 선간전압과 배전용 변압기 접지 Y결선의 상전압에 과전압이 인가됨으로써 철심 포화로 철공진이 발생한다는 것을 시뮬레이션을 통해 입증되었다. 또한, 이를 방지하기 위해서는 1) 강/승압 변압기를 접지 Y결선의 상전압으로 교체하면, 강/승압 변압기와 배전용 변압기가 상전압으로 일정하여 PT에 전압 강하가 발생되지 않고, 철심포화를 방지할 수 있는 것을 시뮬레이션을 통해 입증 되었다. 2) 또한, 배전용 변압기를 재설계하여 정격전압 범위를 선간전압으로 설계한다면 철심포화 현상을 방지할 수 있다. 따라서 철공진이 주로 발생하는 변압기와 차단기, 변압기와 변압기간의 결선, 변압기의 비접지에서 변압기의 철심과 코일의 상호작용을 이해한다면, 변압기 포화에 의한 철공진 현상을 방지할 수 있을 것이다.

References

- [1] G.Morkyani, M.-R.Haghifam, "Analysis of ferroresonance in a 20kV distribution network", International conference on power electronics and intelligent transportation system, p.p 31-35, 2009.
- [2] Madhab Roy, Chinmay Kanti Roy, "A study on ferroresonance and its dependence on instant of switching angle of the source voltage", Third international conference on power systems, Kharagpur, p.p 1-6, India December 27-29, 2009
- [3] S.G Kim, J.C Shin, H.S Cho, S.T Kim, "The Improvement of Ferro-resonance circuit in the W.S Industries Capacitor Voltage Transformer", KIEE Summer Conf., p.p 485-487, July 2003.

- [4] Joo-Hun Lee, Jin Lee, Y.B.Youn, "The study on ferroresonant suppression filters of CVT", IEE Summer Conf., p.p 461-463, July 2001.
- [5] Gu bon il, Baek seoung gil, Kim chul kyu, Lee heui seon, "A case study on Ferroresonance in an underground distribution system of urban railway", The korean society for railway Spring Conf., p.p 1384-1389, 2013.
- [6] E. Price, "A tutorial on ferroresonance", Protective relay engineers, p.p 676-704, 67th Annual Conf. 2014.
- [7] Paul S. Moses, Mohammad A.S.Masoum, Hamid A. Toliyat, "Impacts of hysteresis and magnetic couplings on the stability domain of ferroresonance in asymmetric three-phase three-leg transformers", IEEE Transactions on energy conversion, vol.26, no.2, p.p 581-592, June 2011.
- [8] Yunge Li, Wei Shi, Furong Li, "Novel analytical solution to fundamental ferroresonance-Part I : power frequency excitation characteristic", IEEE transactions on power delivery, vol.21, no. 2, p.p 788-793, April 2006.
- [9] K.S. Cho, K.S. Kim, H.C. Kim, J.R. Shin, "Analysis of the Ferroresonance Characteristics in 3 Phase Transformer Considering Lateral Length of the Primary Cable", KIEE Summer Conf., p.p 825-828, 97.
- [10] Dan D. MAIRS, DON L. STUEHMm BRUCE A. MORRIS, "Overvoltage on five-legged core transformers on Rural electric system", IEEE transactions on industry applications. vol.25, no.2, p.p366-370, March/april 1989.
- [11] Jin-Geun Shon, Dong-joon Kim, Min-Gu Kang, Hee-Jong Jeon, "Magnetic Flux Saturation Analysis of Matching Transformer Considering Characteristic of Dynamic Voltage Restorer(DVR)", Trans., KIEE, vol.57P, no.3, p.p236-243, SEP 2008.
- [12] Dong-Yeol Shin, Donghyun Yun, HanJu Cha, "Problem analysis by iron core structure of the transformer on asymmetric three phase lines and prevention measures", Trans., KIEE, vol.61, No.10, p.p 1536-1541, 2012.

저 자 소 개



윤 동 현 (Dong-Hyun Yun)

1975년 7월 27일생. 2004년 충남대학교 전자공학과 석사졸업, 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 042-935-8547

E-mail : dhyun7585@gmail.com



신 동 열 (Dong-Yeol Shin)

1966년 4월 15일생. 충남대학교 전기공학과 석사졸업. 1992년~2006년 한전 부산지사 근무. 2006년~현재 한전 전력연구원 배전연구소 근무, 2005년 특허분야 정부 신지식인 선정, 2006년 이달의 엔지니어상 수상



차 한 주 (Han-Ju Cha)

1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 포항공대 전자전기공학과 석사졸업, 2004년 미국 Texas A&M University, College station (공학박사), 1990년~2001년 LG산전 연구소 책임연구원, 2005년~현재 충남대학교 전기공학과 부교수.