

비대칭 3상 선로에서 변압기 중성선의 순환전류 해석을 위한 신동파워이론 소개

신동열
한전 전력연구원

Theory Introduction of Shin-Dong Power for Analysis of Circulating Current on Transformer-Neutral Line in Asymmetric Three Phase Lines

Dong-Yeol Shin*
KEPCO Korea Electric Power Research Institute,

Abstract - 분산전원 연계기준에 따라 변압기 1차 중성점을 접지운전 시 Y-Y-3Limb, Y-Δ결선방식은 비대칭 계통전압에 의해 순환전류가 발생된다. 이러한 순환전류는 상별 전류에 영향을 주어 보호계전기 오동작 및 전력량계 오차를 발생시킨다. 따라서 순환전류로 인한 전력계산의 문제를 해결하기 위해 신동파워이론을 만들었다. 본 이론의 핵심은 비대칭 3상 전압과 변압기 결선 및 구조에 의해 발생하는 영상 임피던스 (R+jX) 해석을 통해 중성선의 순환전류를 계산하였다. 따라서 정확한 전력계산을 위해 순환전류에 의해 발생하는 상별전류를 보정하는 새로운 이론을 소개 하고자 한다.

따라서 표 1과 같이 계통운영의 관점에서 기기의 오동작을 방지하기 위해 기존방식과 개선방식의 알고리즘을 비교하였다. 기존 방식은 중성선의 이상전류(전류원+전압원)를 보정없이 있는 그대로 계량하는 방식이지만, 개선방식은 기기의 오동작을 방지하기 위해서 순환전류(전류원)를 보정하고 계량하는 방식이다.

<표 1> 기존방식과 개선방식의 알고리즘 차이점

구 분	기존 방식	개선방식
차이점	중성선의 순환전류 보정없이 상전류 계산 (OCGR → 오동작)	중성선의 순환전류 보정후 상전류 계산 (OCGR → 보정시 미검출)

1. 서 론

1.1 중성선의 순환전류의 발생

우리나라 계통방식은 3상4선식 계통으로 선간부하(Line-Line)와 상간부하(Line-Neutral)로 공급되고 있다. 따라서 부하 불평형에 따라 선로 말단에는 상별 비대칭 전압이 발생된다. 이러한 비대칭 3상 전압 계통에 변압기의 1차 중성점을 접지하여 연계할 때, 변압기의 결선방식과 철심구조에 따라 중성선에 순환전류가 발생된다[1~8]. 이러한 순환전류는 전압이 없는 중성선에 전류원 형태로 발생된다. 따라서 기존은 3상 대칭좌표법은 상별 부하에 의한 불평형 전류(전압원)와 비대칭 전압에 의해 발생하는 순환전류(전류원)가 합산되어 영상전류로 계산되기 때문에 정확한 3상 전력계산이 어려운 문제가 있었다.

1.2 고장전류 계산의 문제점

그림 1은 배전자동화 시스템(DAS)에서 F1 지점 지락 고장시 중성선의 순환전류(역 조류)로 인한 보호계전기가 오동작 된 사례이다[1]. 계통말단에 분산전원용 변압기(Y-Δ변압기)가 연계되어있다. 일반적으로 선로보호용 차단기의 Trip 설정치는 400/100A로 운전하고 있다. F1지점 지락 고장시 전류측 A,B,C,N 상의 전류는 114A, 732A, 703A, 445A 발생하였다. 이때 부하측의 A,B,C,N상 전류는 246A(?), 266A(?), 190A(?), 696A(?)로 발생하였다.

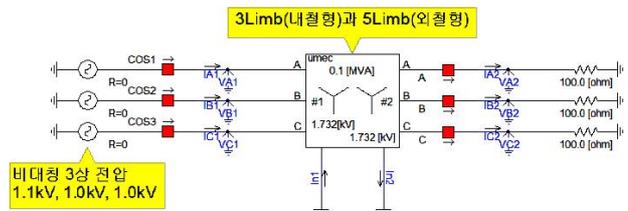
특히 정상적인 계통에서는 중성선의 전류(696A)가 상전류 보다 크게 발생할 수 없다. 하지만 말단 발전고객의 연계용 변압기(Y-Δ결선)로 인한 중성선의 순환전류로 배전자동화 시스템의 OCGR 계전기는 설정치 이상의 고장전류에 정동작(?) 하였다.

하지만 계통운영의 관점에서는 부하측 보호계전기는 동작하지 않아야 하기 때문에 오동작으로 볼 수 있다[1.2.3]. 이와 같이 기존 대칭좌표법은 영상전류는 해석되지만 비대칭 전압계통에 의한 순환전류(전류원)와 부하 불평형에 의해 발생하는 불평형 전류(전압원)를 합산 해석되기 때문에 고장점 이후 상별 전류값이 정상적으로 해석할 수 없기 때문에 보호계전기가 오동작 되었다.

2. 본 론

2.1 중성선의 순환전류 해석을 위한 계통도

그림 2는 비대칭 3상 전압과 변압기 Y-Y결선방식에서 철심형태별 중성선의 순환전류 발생여부를 각각 비교하였다. 변압기의 철심은 내철형(3Limb, 3각 철심)과 외철형(5Limb, 5각 철심)이다. 계통의 비대칭 전압을 모의하기 위해서 상별 전압을 1.1kV, 1.0kV, 1.0kV로 인가하였다. 변압기는 100kVA, %X=0.05pu, 철손 0.002pu, 동손 0.01pu, 여자전류 In의 0.01pu, 상별부하 100Ω, 100Ω, 100Ω로 모의하였다.

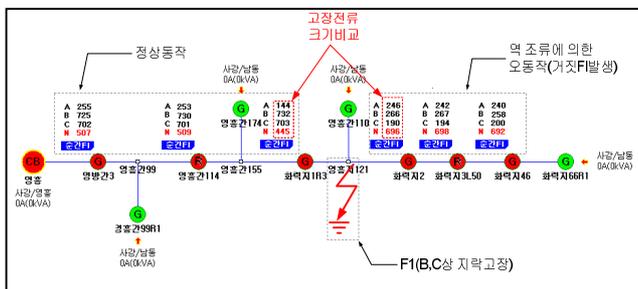


<그림 2> PSCAD/EMTDC 계통도

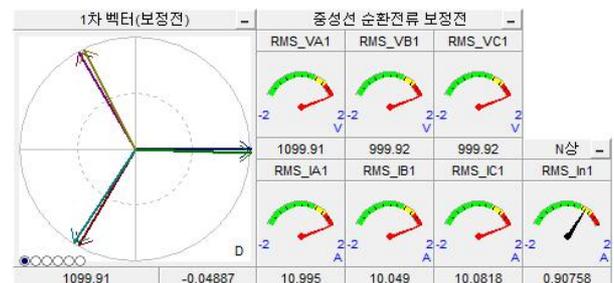
2.2 비대칭 3상 전압과 변압기 결선 및 철심과 관계

2.2.1 비대칭 전압발생시 외철형 변압기 특성시험

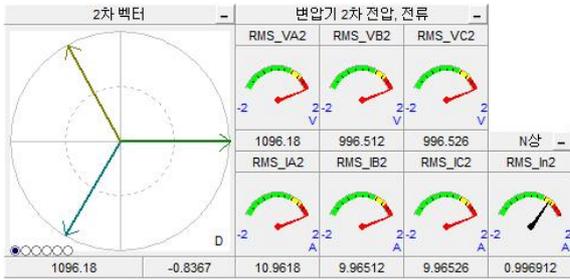
상기 비대칭 계통조건에서 외철형(Y-Y-5Limb) 변압기를 사용할 때, 그림 3과 같이 비대칭 전압과 변압기의 영상임피던스에 의한 중성선의 순환전류를 모의하였다. 3(a)는 1차측 상별 전압과 전류 벡터도이다. 3(b)는 2차측 상별 전압과 전류 벡터도이다. 해석결과 1-2차 전류는 대략 상별 11A, 10A, 10A, 불평형 전류는 1A로 5Limb는 중성선의 순환전류는 발생되지 않았다.



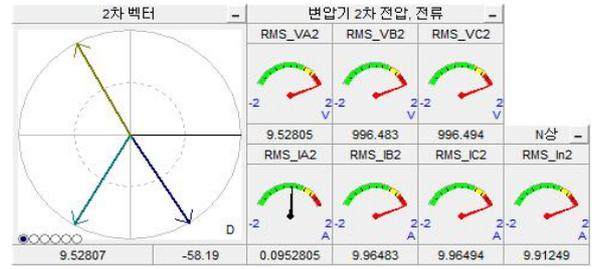
<그림 1> 중성선의 순환전류로 인한 보호계전기 오동작 사례



(a) 변압기 1차측



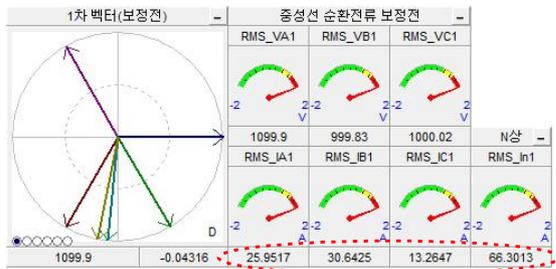
(b) 변압기 2차측
 <그림 3> 비대칭 전압 인가시 외철형변압기 특성



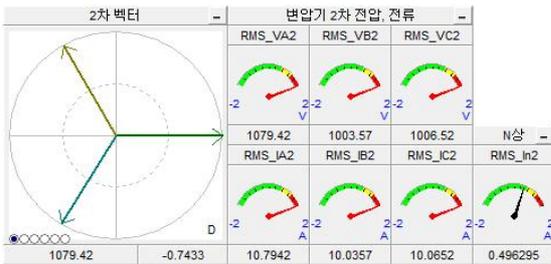
(b) 변압기 1차측
 <그림 5> a상 off시 외철형 변압기 특성

2.2.2 비대칭 전압발생시 내철형 변압기 특성시험

상기 비대칭 계통조건에서 내철형(Y-Y-3Limb) 변압기를 사용할 때 중성선의 순환전류를 모의하였다. 해석결과 1차측 전류는 4(a)와 같이 상별 26A(?), 31A(?), 13A(?), 중성선의 전류는 66A(?)가 발생하였다. 2차측 전류는 4(b)와 같이 11A, 10A, 10A, 0.5A가 발생하였다. 따라서 동일변압기의 권수비(1:1)에서 1차측 전류와 2차측 전류를 비교할 때, 1차측 전류는 변압기 손실전류와 2차측 부하전류가 합산되어야 하나 3각 철심(△결선)으로 인한 중성선의 순환전류(66A)로 상별 전류값이 2차 전류와 다르게 발생되었다.



(a) 변압기 1차측

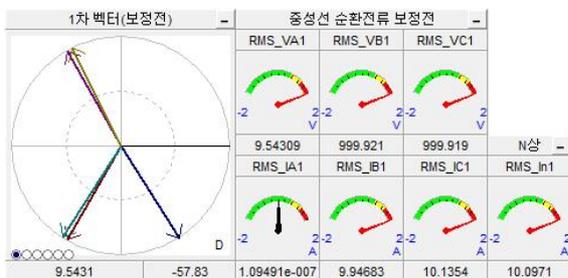


(b) 변압기 2차측

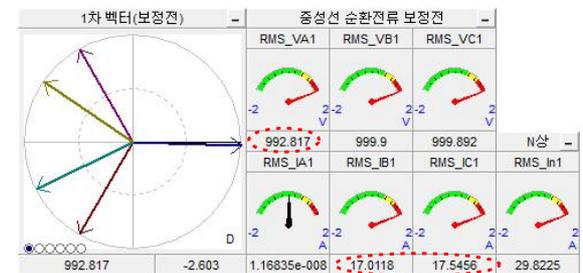
<그림 4> 비대칭 전압 인가시 내철형 변압기특성

2.2.3 A상 결상시 외철형 변압기 특성시험(A상 COS OFF)

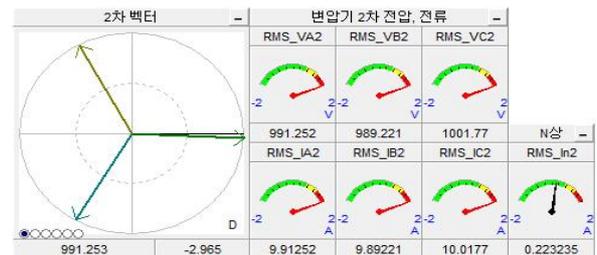
상기 비대칭 계통조건에서 외철형(Y-Y-5Limb) 변압기를 사용할 때 A상 결상시 1-2차측 상별전압과 전류를 모의하였다. 해석결과 5(a)와 같이 상별 전압은 0kV, 1.0kV, 1.0kV, 전류는 0A, 9.9A, 10A, 중성선의 전류는 10A가 발생하였다. 또한 5(b)와 같이 2차측 전압은 0kV, 1.0kV, 1.0kV, 전류는 0A, 9.9A, 10A, 중성선의 전류는 10A가 발생하였다. 요약하면 Y-Y-5Limb 변압기는 전자기적으로 1-2차 코일이 Y결선, 철심도 Y결선으로 구성된다[1]. 즉 1차측 A상 COS OFF시, 2차측도 A상 전원이 OFF되며, 1-2차측 전압과 전류파형이 동일하게 발생된다.



(a) 변압기 1차측



(a) 변압기 1차측

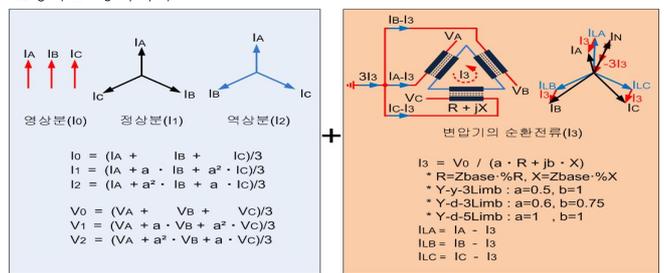


(b) 변압기 2차측

<그림 6> a상 off시 내철형 변압기 특성

2.3 순환전류 보정을 위한 신동파워론 소개

회로를 해석할 때 전압원과 전류원 있다. 전압원(V) 기준으로 부하(Z)의 크기에 따라 전류(I)를 해석한다. 따라서 이론적으로 전압원에서 중성선의 전류가 상전류보다 크게 발생 될 수 없다. 신동파워론은 순환전류로 인한 전력계산의 문제를 해결하기 위해 그림 6과 같이 비대칭 3상 전압과 변압기 결선 및 구조에 의해 발생하는 영상 임피던스(R+jX) 해석을 통해 중성선의 순환전류를 계산하였다. 따라서 정확한 전력계산을 위해 순환전류에 의해 발생하는 상별전류를 보정하는 방식이다.



[기존 3상 대칭좌표법 해석]

[계통에 의한 순환전류 해석]

<그림 6> 순환전류 보정을 위한 신동파워론

현재 대칭좌표법은 3상 전력계통의 불평형 문제를 계산하는 수학적 기법으로 기존 전력계산 이론과 신동파위이론의 차이점은 표2와 같다.

〈표 2〉 기존 전력계산 이론과 차이점

구분	기존(대칭좌표법) 이론	신동파위이론
차이점	전압원, 전류원 구분없이 계산	전압원 기준계산
	변압기의 철심구조 미적용	변압기의 철심구조 적용
	순환전류 보정없이 계산	순환전류 보정후 계산
	중성선의 불평형 전류	비대칭 부하에 의한 불평형전류 비대칭 전압에 의한 불평형전류

2.4 순환전류 보정을 위한 신동파위이론 검증

비대칭 3상 선로에서 상별 Va, Vb, Vc 전압을 이용하여 영상전압 (V0)을 식(1)과 같이 계산된다.

$$V_0 = (Va + Vb + Vc) / 3 \quad (1)$$

비대칭 3상 전압발생시, 변압기의 결선방식과 철심구조(Y-Y-3Limb, Y-Δ-3Limb, Y-Δ-5Limb)는 영상임피던스(Z0)를 식(2)와 같이 계산되며, a값은 동손에 대한 보정 값이며, b는 누설리액턴스에 대한 보정값이다.

$$Z_0 = aR + jbX \quad (2)$$

- Y-Y-3Limb : a=0.5, b=1
- Y-Δ-3Limb : a=0.6, b=0.75
- Y-Δ-5Limb : a=0.5, b=1

식(2)에서 변압기의 코일의 R+jX값은 식(3)과 식(4)와 같이 계산할 수 있다.

$$R = \frac{V^2}{P} \times Rpu \quad (3)$$

$$X = \frac{V^2}{P} \times Xpu \quad (4)$$

- V : 선간전압, P : 변압기용량

I=V/R 오옴법칙에 따라 변압기 2차 코일 또는 철심에서 발생하는 순환전류는 식(5)와 같이 계산할 수 있다.

$$I_3 = \frac{V_0 \angle \theta_{v0}}{Z_0 \angle \theta_{z0}} \quad (5)$$

이러한 변압기의 순환전류(I3)는 전류원으로 변압기 1차 중성선을 통하여 계통에 유입되며, 중성선의 순환전류(Icn)는 식(6)과 같이 계산할 수 있다.

$$Icn = I_3 \times 3 \quad (6)$$

정확한 전력계산을 위해 순환전류를 보정후 상별전류는 Ia', Ib', Ic', In' 식(7)~식(10)으로 각각 계산한다.

$$Ia' = Ia - I_3 \quad (7)$$

$$Ib' = Ib - I_3 \quad (8)$$

$$Ic' = Ic - I_3 \quad (9)$$

$$In' = In - Icn \quad (10)$$

- 순환전류 보정전 상별전류 Ia, Ib, Ic, In

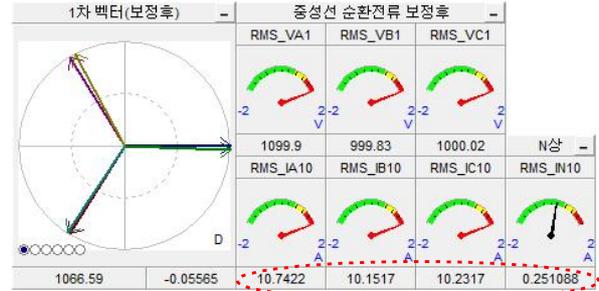
〈표 3〉 신동파위이론을 적용한 상별 순환전류 보정계산 결과

구분	수학적 검증	비교
변압기 이력 및 순환전류 보정(전) 측정값	변압기 : P=100 kVA, V=1732 kV, Rpu = 0.01, Xpu = 0.05 상별 측정전압[kV]: 1.1/0°, 1.0/240°, 1.0/120° 상별 측정전류[A]: 26/300°, 31/264°, 13/120° 중성선의 순환전류[A]: 66/6°	
순환전류 보정후 상별전류	$V_0 = (Va + Vb + Vc) / 3 = 33.3 / -0.9^\circ$ $Z_0 = aR + jbX = 1.507 / 84.3^\circ$ $I_3 = \frac{V_0 \angle \theta_{v0}}{Z_0 \angle \theta_{z0}} = 22.1 / -85.2^\circ$ $Icn = I_3 \times 3 = 66.3 / -85.2^\circ$ $Ia' = Ia - I_3 = 10.7 / -2.6^\circ$ $Ib' = Ib - I_3 = 10.1 / 236.6^\circ$ $Ic' = Ic - I_3 = 10.2 / 118.5^\circ$ $In' = In - Icn = 0.25 / 97.5^\circ$	a=0.5 b=1.0

2.5 신동파위 이론을 적용한 시뮬레이션 결과

Y-Y-3Limb 변압기는 비대칭 전압발생시 그림4(a)와 같이 중성선의 순환전류로 인해 상별 전류는 26A(?), 31A(?), 13A(?), 중성선의 전류는 66A(?)가 발생하였다.

그림 7은 신동파위 이론을 적용하여 중성선의 순환전류를 보정후 1차측 상별전류는 해석하였다. 해석결과 상별전류는 11A, 10A, 10A, 중성선은 0.3A로 2차측 전류와 비슷하게 측정되었다. 또한 그림5(a)와 같이 a상 cos off시 상별전류는 0A, 17A, 17A, 중성선의 전류는 30A가 발생하였다. 중성선의 순환전류를 보정후 1차측 10A, 10A, 10A, 중성선은 0.1A로 2차측 전류와 비슷하게 측정되었다.



〈그림 7〉 내철형 변압기 순환전류 보정후 전류특성

3. 결 론

본 논문에서는 전력계통에 비대칭 전압이 발생되면 변압기의 결선 및 철심구조(Y-Y-3Limb, Y-Δ-3Limb or 5Limb)에 의해 순환전류가 발생되고 있다. 이러한 순환전류는 중성선에 발생하는 전류원 소스이다. 이런 전류원 소스는 상별전류에 영향을 주어 보호계전기 오동작, 전력량계 오차발생 등 여러가지 전력계산에 문제가 발생되고 있다. 기존 대칭좌표법은 상별 전류를 수학적으로 계산하여 불평형 전류를 계산하는 방식으로 전류원과 전압원 소스를 모두 합산해서 계산하는 방식이다.

신동파위이론의 핵심은 비대칭 전압 계통에서 변압기의 1차 코일(Yg 결선)과 철심(3Limb) 또는 2차 코일(Δ결선)간 전자기적 충돌로 발생하는 영상 임피던스값을 계산하여 순환전류를 계산하였다. 또한 정확한 3상 전력계산을 위하여 전류원 소스(순환전류)를 제거후 상별전류를 보정하여 계산하는 방법을 소개하였다. 따라서 본 논문은 보호계전기 오동작 방지, 전력량계 오차보정, 변압기 설계, 각종 제어기 설계에 많이 이용될 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 신동열, 박용우, 차한주 “분산형 발전고객의 OCGR 오동작 및 과부족 계량에 대한 사례연구”, 대한전기학회 논문지 57권 제8호, 2008. 8
- [2] 신동열, 하복남, 정원욱, 차한주 “배전계통에서 변압기 결선에 의한 역 조류 현상에 관한 연구”, 조명설비학회 논문지 22권 제9호, 2008. 9
- [3] 신동열, 김동명, 차한주, “분산전원 연계선로에서 지락고장시 중성선의 과전류 해석 및 보호계전기의 새로운 알고리즘”, 대한전기학회 논문지 제58-10호, 2009년 10월
- [4] 전력연구원 송배전연구소 기술지원(2011-K-000374-1), “22.9kV 배전선로 단선으로 인한 수용가측 MOF손손원인 분석”, 2011. 08
- [5] W. Enright, N. Watson, O. B. Nayak, Three-Phase Five-Limb Unified Magnetic Equivalent Circuit Transformer models for PSCAD V3, IPST '99 Proceedings, Budapest, pp. 462-467, 1999.
- [6] 전력연구원 기술지원(2011-K-000389-1), “결선 및 불평형 부하시 변압기 결선(Y,Δ) 및 철심구조(3-Limb, 5-Limb)별 1-2차 전류해석”, 2011. 08
- [7] 신동열, 윤동현, 차한주, “비대칭 3상 선로에서 변압기의 철심구조별 문제점 분석 및 방지대책”, 대한전기학회 논문지 제61-10, 2012. 09
- [8] 신동열, 박창호, 정영범, 김석곤, “3상 변압기의 철심구조별 특성실험 및 분석”, 대한전기학회 전기설비 부문화 추계학술대회, 2011년 11월
- [9] 신동열, 윤동현, 차한주, “분산전원 연계선로에서 보호계전기의 상전류 오차보정 알고리즘 개발”, 대한전기학회 논문지 제62-11, 2013.10
- [10] 전력연구원 기술지원(2015-K-000029-1), “태양광 발전고객(465kW) 계량오차 분석 보고서”, 2015. 01