

전력용 변압기에서 권선방식과 벡터그룹에 따른 보호계전기 동작원리의 그래픽 표현

이종범
원광대학교

Graphical Presentation on Operation Principle of Protective Relay According to Winding Type and Vector Group in Transformer

Jong-Beom Lee
Wonkwang University

Abstract - Protective relay for transformer operates in general by comparing with the differential current and the restraint current. These kinds of currents are changed on magnitude and phasor during the fault according to winding type and vector group. This paper presents the differential and restraint currents and operational principle of differential protective relay for two-winding and three-winding transformer with graphical model. It is developed using MATLAB for an educational purpose on engineer related in power system and protection in university and power utility including large factory.

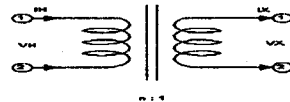


그림 1. 2권선 변압기의 등가회로

- V_H : H측 선간전압
- V_X : X측 선간전압
- $I_{H_{a,b,c}}$: H측 각 상의 CT 1차 전류
- $i_{H_{a,b,c}}$: H측 각 상의 CT 2차 전류
- $I_{X_{a,b,c}}$: X측 각 상의 CT 1차 전류
- $i_{X_{a,b,c}}$: X측 각 상의 CT 2차 전류
- $iD_{a,b,c}$: 각 상의 차동전류
- $iR_{a,b,c}$: 각 상의 억제전류

먼저 전압비는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$n = \frac{V_H}{V_X} \text{----- (1)}$$

또한 계수 CHX 는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$CHX = \frac{1}{n} \cdot \frac{nCTX}{nCTH} \text{----- (2)}$$

양측에서 CT 2차전류는 1차전류로부터 다음과 같이 표현된다.

$$iH_a = \frac{1}{nCTH} \cdot IH_a \text{----- (3)}$$

$$iH_b = \frac{1}{nCTH} \cdot IH_b \text{----- (4)}$$

$$iH_c = \frac{1}{nCTH} \cdot IH_c \text{----- (5)}$$

$$iX_a = -\frac{1}{nCTX} \cdot IX_a \text{----- (6)}$$

$$iX_b = -\frac{1}{nCTX} \cdot IX_b \text{----- (7)}$$

$$iX_c = -\frac{1}{nCTX} \cdot IX_c \text{----- (8)}$$

2.1.1 Yg - Δ 변압기의 경우

(1) 벡터 1

$$\begin{bmatrix} iD_a \\ iD_b \\ iD_c \\ iR_a \\ iR_b \\ iR_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & 0 & -1/\sqrt{3} & CHX & 0 & 0 \\ -1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} & 0 & 0 & CHX & 0 \\ 0 & -1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} & 0 & 0 & CHX \\ 0.5/\sqrt{3} & 0 & -0.5/\sqrt{3} & -0.5CHX & 0 & 0 \\ -0.5/\sqrt{3} & 0.5/\sqrt{3} & 0 & 0 & -0.5CHX & 0 \\ 0 & -0.5/\sqrt{3} & 0.5/\sqrt{3} & 0 & 0 & -0.5CHX \end{bmatrix} \begin{bmatrix} IH_a \\ IH_b \\ IH_c \\ IX_a \\ IX_b \\ IX_c \end{bmatrix} \text{----- (9)}$$

2.1.2 Δ - Yg 변압기의 경우

(1) 벡터 9

$$\begin{bmatrix} iD_a \\ iD_b \\ iD_c \\ iR_a \\ iR_b \\ iR_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & CHX/\sqrt{3} & -CHX/\sqrt{3} \\ 0 & 1 & 0 & -CHX/\sqrt{3} & 0 & CHX/\sqrt{3} \\ 0 & 0 & 1 & CHX/\sqrt{3} & -CHX/\sqrt{3} & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 & -0.5CHX/\sqrt{3} & 0.5CHX/\sqrt{3} \\ 0 & 0.5 & 0 & 0.5CHX/\sqrt{3} & 0 & -0.5CHX/\sqrt{3} \\ 0 & 0 & 0.5 & -0.5CHX/\sqrt{3} & 0.5CHX/\sqrt{3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} IH_a \\ IH_b \\ IH_c \\ IX_a \\ IX_b \\ IX_c \end{bmatrix} \text{----- (10)}$$

2.2 3권선 변압기

3권선 변압기의 등가회로는 그림 2와 같이 표현된다.

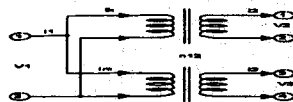


그림 2. 3권선 변압기의 등가회로

1. 서 론

전력계통에서는 변압기를 통하여 전류와 전압의 크기가 변환되어 일정한 전력을 전송하게 된다. 따라서 전력회사가 운전하는 대단위 변전소뿐만 아니라 일반 수용가에서 변압기는 필수적으로 운전되고 있는 전력설비이다. 그런데 이러한 변압기 내부에서 고장이 발생하면 전력의 전송 및 수급에 결정적인 타격을 주어 대단위 정전에 이르게 되므로 현장에서는 변압기용 보호계전기로서 주로 사용되고 있는 차동보호계전기를 이용하여 변압기가 내부고장인가와 외부고장인가를 즉시 판별하여 차단 여부를 결정하게 된다. 이 때 변압기의 고장이 내부인가, 외부인가를 결정하는 요소가 바로 양측의 전류로부터 구해지는 차동전류(differential current)와 억제전류(restraint current)이다[1]-[6].

그러나 변압기는 권선방식에 따라서도 여러 종류가 있고 또한 한 가지 권선방식에서도 양측의 접속방식에 따라 다양한 벡터의 형태가 나타나게 된다[7]. 따라서 이와 같은 여러종류의 권선방식과 벡터그룹에서 각종 변압기의 내부 및 외부 고장시 차동전류와 억제전류가 어떻게 나타나는가에 대해 전류 검출과정 및 그 결과들을 이해하기 쉬운 그래픽으로 표현하는 것뿐만 아니라 이를 기초로 하여 변압기 보호계전기의 동작 원리를 그래픽으로 표현한다는 것은 변압기 보호원리의 이론적 이해를 위해 매우 유익한 교육적 효과를 지니고 있다고 사료된다. 지금까지는 변압기는 물론이고 보호계전기 분야의 경우 그 보호원리 및 Trip 배경을 시각적으로 그래픽 표현을 한 경우가 없어 이들을 이해하는데 많은 어려움이 있던 것이 사실이었다.

본 논문에서는 이러한 배경에서 3상 2권선 변압기와 3권선 변압기를 대상으로 하였다. 2권선 변압기의 권선형태는 Yg-Δ, Δ-Yg, 2 종류를 선택하였고, 3권선 변압기는 Yg(1차)-D(2차)-Yg(3차)의 권선방식을 채택하였다. 그리고 그래픽 표현은 MATLAB에서 Simulink과 Power System Blockset Library를 사용하였고, 이러한 그래픽 표현을 통해 변압기에서 내부 및 외부 고장시 차동전류와 억제전류의 크기 및 위상 변화뿐만 아니라 보호계전기의 동작 원리 및 Trip 결과를 매우 시각적으로 볼 수 있도록 하였다.[8]-[10]

본 연구는 사실상 관련 기술자와 학생들의 교육적인 목적을 위해 시도한 것이다. 따라서 이러한 그래픽 표현 및 결과는 대학 및 대학원의 전력계통 전공과목 학생들은 물론이고 전력회사나 일반 회사에서 전력계통 보호 관련 기술자들의 연수를 위해 매우 효과적으로 사용되어 질 것으로 기대되며 더 많은 전력계통 분야로 확대할 수 있음을 보여주고 있다고 사료된다.

2. 차동전류와 억제전류

2.1 2권선 변압기

2권선 변압기의 등가회로는 그림 1과 같이 표현된다. 그림 1로부터 차동전류와 억제전류를 유도하기 위해 사용된 기호들은 다음과 같다.

- n : 권선비
- $nCTH$: H 측의 CT 비율
- $nCTX$: X 측의 CT 비율

그림 2로부터 1차, 2차 및 3차측에서 변압기 방향의 CT 2 차전류는 1차전류로부터 다음과 같이 표현된다.

$$i_{1a,b,c} = \frac{1}{nCT_1} \cdot I_{1a,b,c} \quad \text{----- (11)}$$

$$i_{2a,b,c} = \frac{1}{nCT_2} \cdot I_{2a,b,c} \quad \text{----- (12)}$$

$$i_{3a,b,c} = \frac{1}{nCT_3} \cdot I_{3a,b,c} \quad \text{----- (13)}$$

또한, 각 측의 전류 크기를 match 시키는 계수 CHX 는 식 (14) - 식 (16)과 같이 표현된다.

$$CHX_{12} = \frac{1}{n_{12}} \cdot \frac{nCT_2}{nCT_1} \quad \text{----- (14)}$$

$$CHX_{13} = \frac{1}{n_{13}} \cdot \frac{nCT_3}{nCT_1} \quad \text{----- (15)}$$

$$CHX_{23} = \frac{1}{n_{23}} \cdot \frac{nCT_3}{nCT_2} \quad \text{----- (16)}$$

(1) Yg-D-Yg의 경우

$$iD_a = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{1a} - i_{1c}) + CHX_{12} \cdot i_{2a} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot CHX_{13} \cdot (i_{3a} - i_{3c})$$

$$iD_b = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{1b} - i_{1a}) + CHX_{12} \cdot i_{2b} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot CHX_{13} \cdot (i_{3b} - i_{3a})$$

$$iD_c = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{1c} - i_{1b}) + CHX_{12} \cdot i_{2c} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot CHX_{13} \cdot (i_{3c} - i_{3b})$$

$$iR_a = \frac{1}{3} \left[\frac{1}{\sqrt{3}}(i_{1a} - i_{1c}) - CHX_{12} \cdot i_{2a} - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot CHX_{13} \cdot (i_{3a} - i_{3c}) \right]$$

$$iR_b = \frac{1}{3} \left[\frac{1}{\sqrt{3}}(i_{1b} - i_{1a}) - CHX_{12} \cdot i_{2b} - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot CHX_{13} \cdot (i_{3b} - i_{3a}) \right]$$

$$iR_c = \frac{1}{3} \left[\frac{1}{\sqrt{3}}(i_{1c} - i_{1b}) - CHX_{12} \cdot i_{2c} - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot CHX_{13} \cdot (i_{3c} - i_{3b}) \right]$$

----- (17)

3. 변압기 및 보호계전기의 그래픽 모델 구성

3.1 2권선 변압기

2 종류의 2권선 변압기에 대해서 차동전류와 억제전류를 표현하기 위한 모델들을 MATLAB내에서 Simulink와 Power System Blockset Library를 이용하여 각각 구성하였으며, 여기서는 그림 3과 같은 Yg-Δ 변압기의 경우만을 제시하였다. 그림 3에서 보여주는 여러 가지의 Block중 변압기 모델 부분은 시험 대상에 따라 이미 구성된 모델을 바꾸어 주므로 쉽게 처리될 수 있으며, 본문에서는 동일한 원리이므로 그 결과에 대해서는 지면상 생략하였다. 한편 DIFFERENTIAL RELAY Block는 차동보호계전기의 기능에 해당되는 범위를 표현한 것이다. 그리고 이 가운데 있는 DIFFERENTIAL Block은 Sampling을 통해 차동전류의 Magnitude와 Phasor를 계산하여 나타내는 기능을 갖고 있고, RESTRAINT Block도 마찬가지로 억제전류의 Magnitude와 Phasor를 나타내는 기능을 갖고 있다. 그리고 Pick-up은 보호계전기 Trip을 위한 Pick-up 전류의 한계 값을 입력하는 Block이다. 한편, DIF-RES는 각 상별로의 차동전류와 억제전류의 크기를 X-Y Plane에서 보여주는 기능을 가진 Block이며, Differential Current와 Restraint Current Block은 각 Scope를 통해 동시에 고장 전후에 발생하는 각상의 차동전류와 억제전류의 순시치를 볼 수 있는 기능을 갖고 있다.

가. VG-2

VG-2 Block은 MUX, calculus 및 DEMUX의 세 Block으로 Subsystem이 구성되어 있으며, 이중 calculus는 Simulink Library중 S-functions을 연산하는 Block이다. 여기에서 변압기 양측의 6개 전류가 입력되며 이 전류들은 식 (1) - 식 (10)까지의 과정을 거쳐 차동전류와 억제전류의 크기와 형태들을 변압기의 종류 및 벡터그룹에 따라 선택하여 제시한다.

나. Fault

Fault는 전체 시뮬레이션 과정 중 고장을 발생시키는 시간을 입력할 수 있고 내부 및 외부고장을 구별할 수 있도록 각 상과 접속시킬 수 있게 하였다. 그 이외에도 SOURCE 및 LOAD Block을 통해 매뉴 방식으로 데이터를 입력할 수 있다.

표 1. 시험에서 사용된 입력자료.

권선방식	VH[kV] (ph-ph)	VX[kV] (ph-ph)	1차측 및 2차측				정격용량 (MVA)	주파수 [Hz]	nCTH	nCTX
			R [pu]	X [pu]	Rm [pu]	Xm [pu]				
Yg-D	13.8	315	0.0025	0.1	500	500	300	60	12,000:5	500:5
D-Yg	13.8	315	0.0025	0.1	500	500	300	60	12,000:5	500:5

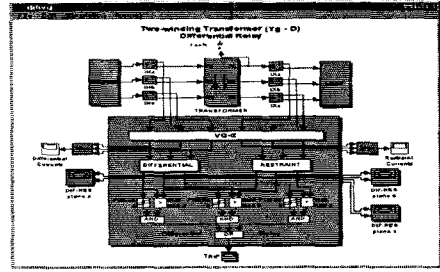


그림 3. 2권선 변압기 차동보호계전기의 동작 원리 표현을 위한 그래픽 모델.

3.2 3권선 변압기

두 종류의 3권선 변압기에 대해서 차동전류와 억제전류를 표현하기 위한 모델들을 MATLAB내에서 Simulink와 Power System Blockset Library를 이용하여 그림 4와 같이 구성하였다. 여기서는 Yg(1차)-D(2차)-Yg(3차) 권선방식의 변압기에 대해서만 제시하기로 한다.

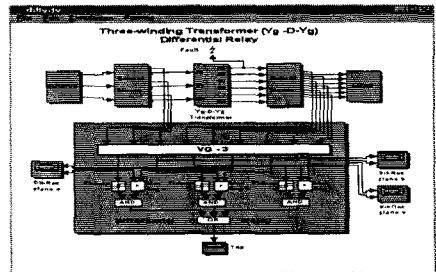


그림 4. 3권선 변압기 차동보호계전기의 동작 원리 표현을 위한 그래픽 모델.

4. 시험 및 결과

4.1 2권선 변압기

시험을 위해 선정한 각 변압기마다의 입력자료는 표 1에서 보여주고 있으며, 표 2는 각각의 변압기에서 벡터그룹의 경우 고장이 변압기 내부 혹은 외부일 경우의 차동전류 및 억제전류 크기와 보호계전기 Trip 여부를 보여주고 있다. 이 표들로부터 알 수 있듯이 변압기에서 내부고장이 발생하면 보호계전기는 모두 정상적으로 Trip 하였으며, 외부 고장시에는 각 상의 차동전류 모두가 0이므로 Trip 되지 않음을 알 수 있다. 그림 5 - 그림 6은 그림 3의 모델에서 Yg-Δ 변압기 내부고장(X측 지락)이 0.1초에서 발생하였을 경우에 대한 시뮬레이션 과정에서 X-Y Plane에서의 결과와 함께 Trip 결과를 보여주고 있다. Trip의 경우에서 크기가 0이면 No Trip이며 1.0이면 Trip 하였음을 의미한다. 그림 6은 Trip 결과를 보여주고 있다. Pick-up에서 동작 한계치를 입력할 수 있으며 여기서는 0.25[A]로 입력하였다. 1.0으로 보여 고장 직후 바로 Trip되었음을 알 수가 있다.

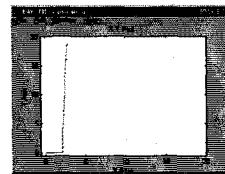


그림 5. X-Y Plane a의 결과.

표 2. 시험결과.

권선방식	고장위치	위치	벡터종류	고장상	차동전류크기[A]			억제전류크기[A]			Trip
					iDa	iDb	iDc	iRa	iRb	iRc	
Yg-D	내부	X	1	a	18.86	0.02	0.02	9.43	9.46	12.88	Yes
	외부	X	1	b	0.02	0.02	0.02	12.88	18.87	9.47	No
D-Yg	내부	X	11	c	21.05	0.02	21.06	8.07	7.21	14.58	Yes
	외부	H	11	b	0.02	0.02	0.02	7.23	7.22	7.23	No

표 3. 시험에서 사용된 입력자료.

권선방식	선간 전압 V1[kV]	선간 전압 V2[kV]	선간 전압 V3[kV]	Parameters				정격 용량 [MVA]	주파수 [Hz]	nCT1	nCT2	nCT3
				R [pu]	X [pu]	Rm [pu]	Xm [pu]					
Yg-D-Yg	735	315	60	0.002	0.08	500	500	1,500	60	190:5	380:5	290:5

표 4. 시험결과.

권선 방식	벡터 (1차-2차-3차)	고장지점		차동전류 크기[A]			억제전류 크기[A]			Trip
		위치	상	iDa	iDb	iDc	iRa	iRb	iRc	
Yg-D-Yg	(0도)-(-30도)-(0도)	내부	A2	17.41	0.02	0.03	6.33	4.64	7.93	Yes
		내부	B2-C2	0.02	0.03	17.37	4.63	7.92	6.35	Yes
		내부	B3	0.02	34.37	34.36	4.64	14.5	12.1	Yes
		외부	C1	0.02	0.02	0.02	4.64	4.64	4.64	No

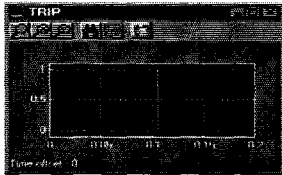


그림 6. Trip 결과.

4.2 3권선 변압기

시험을 위해 선정된 3권선 변압기의 입력자료는 표 3과 같다. 그리고 표 4는 각각의 변압기에서 내부 또는 외부고장시 차동전류 및 억제전류의 크기와 보호계전기 Trip 여부를 보여주고 있다. 이 표로부터 알 수 있듯이 변압기에서 내부 고장이 발생하면 보호계전기는 모두 정상적으로 Trip 하였으며, 외부 고장시에는 각 상의 차동전류 크기가 모두 0에 가까우므로 Trip 되지 않았음을 알 수 있다.

그림 7에서는 RESTRAINT a Block에서 차동전류와 억제전류의 크기 및 위상이 이해되는 것을 볼 수가 있다. 3권선 변압기에 대해 본 논문에서 보여준 시험 외에 다른 고장시에도 좋은 결과들을 보여 주었다.

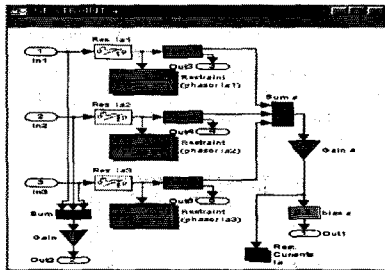


그림 7. RESTRAINT a Block의 결과.

6. 결론

본 논문에서는 2권선 및 3권선 변압기에 대해 각 권선 방식 및 고장종류에 따라 달라지는 차동전류와 억제전류 뿐만 아니라 이를 바탕으로 변압기 내부 및 외부 고장시의 차동보호계전기의 동작원리를 MATLAB의 여러 Library들을 이용하여 그래픽으로 이해하기 쉽게 표현하였다. 따라서 여기서 표현되는 모델 및 시험 결과들은 학부 및 대학원 그리고 전력회사나 일반회사에서 전력계통 및 보호관련자들의 교육과정에서 매우 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 본 논문에서 구성된 모델이 갖는 특성을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 변압기 권선방식 및 벡터그룹에 따라 모델 구성을 달리 하였다.
- (2) 입력값들은 click을 통하여 메뉴 방식으로 요구하는 값들을 입력할 수 있다.
- (3) 모델의 Main Block들은 최대한 간결하고 이해하기 쉽도록 Subsystem을 많이 사용하였다.
- (4) 모델 구성시 자칫 복잡해 질 수 있는 Block을 줄이기 위해 차동전류 및 억제전류의 계산부분은 S-function으로 처리하여 간결하게 하였다.
- (5) 모든 종류의 내부 및 외부 고장을 모의하는데 어려움이 없도록 Fault Block을 만들어 이용하도록 하였다.
- (6) 차동전류 및 억제전류의 크기 및 위상각을 Display하고 X-Y 평면에서 보이도록 하였다.
- (7) 전력계통의 다른 분야로의 확대 가능성을 제시하였다.

참고 문헌

- [1] Stanley H. Horowitz, and Arun .G. Phadke, "Power System Relaying", Chapter 8, RSP, 1995
- [2] Arun. G. Phadke and James S. Thorp, "Computer Relaying for Power Systems", Chapter 2, 1993.
- [3] ABB, "Transformer Protection Unit", TPU 2000R, ABB Network Partner, 1998.
- [4] IEEE, "IEEE Guide for the Protection of Network Transformers", IEEE, 1989.
- [5] Girgis. A.A, Hart.D.G and Chang. W.B, "An Adaptive Scheme for Digital Protection of Power Transformers", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, NO. 2, April 1992.
- [6] P. Mudditt and R. Niven, "Developments in Transformer Protection", 4th Int'l Conference on IEE, 1989.
- [7] Paul M. Anderson, "Analysis of Faulted Power System", IEEE Press, 1995.
- [8] MATLAB Manual, 1998.
- [9] IEE, "Power System Protection, Vol. Principles and Components", 1995.
- [10] Sachdev. M.S, Sidhu. T.S and Wood. H.C, "A Digital Relay Algorithm for Detecting Transformer Winding Faults", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 3, July 1989.