

그림 1. 2권선 변압기의 등가회로  
Fig. 1. Equivalent circuit of two-winding transformer.

- $V_X$  : X측 선간전압
- $I_{H_{a,b,c}}$  : H측 각 상의 CT 1차 전류
- $iH_{a,b,c}$  : H측 각 상의 CT 2차 전류
- $I_{X_{a,b,c}}$  : X측 각 상의 CT 1차 전류
- $iX_{a,b,c}$  : 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.

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

한편 양측에서 CT 2차전류는 1차전류로부터 다음과 같이 표현된다.

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

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

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

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

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

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

2권선 변압기의 종류와 벡터그룹은 일반적으로 표 1에서 보여주는 것들로 이루어져 있다. 따라서 이들의 경우에 대해 모두 차동전류 및 억제전류를 구할 수 있으며, 여기서는 그 중 일부를 표현하면 식(9) - 식(14)와 같다.

표 1. 2권선 변압기의 종류 및 벡터그룹.  
Table 1. Types and vector groups of transformer.

2권선 변압기의 종류	벡터그룹
Yg - Δ	1,3,5,7,9,11
Δ - Yg	1,3,5,7,9,11
Yg - Yg	0,6
Δ - Δ	0,6

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) 벡터 5

$$\begin{bmatrix} iD_a \\ iD_b \\ iD_c \\ iR_a \\ iR_b \\ iR_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} & 0 & CHX & 0 & 0 \\ 0 & -1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{3} & 0 & CHX & 0 \\ 1/\sqrt{3} & 0 & -1/\sqrt{3} & 0 & 0 & CHX \\ -0.5/\sqrt{3} & 0.5/\sqrt{3} & 0 & -0.5CHX & 0 & 0 \\ 0 & -0.5/\sqrt{3} & 0.5/\sqrt{3} & 0 & -0.5CHX & 0 \\ 0.5/\sqrt{3} & 0 & -0.5/\sqrt{3} & 0 & 0 & -0.5CHX \end{bmatrix} \begin{bmatrix} iH_a \\ iH_b \\ iH_c \\ iX_a \\ iX_b \\ iX_c \end{bmatrix} \text{----- (10)}$$

2.1.2 Δ - Yg 변압기의 경우

(1) 벡터 5

$$\begin{bmatrix} iD_a \\ iD_b \\ iD_c \\ iR_a \\ iR_b \\ iR_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -CHX/\sqrt{3} & 0 & CHX/\sqrt{3} \\ 0 & 1 & 0 & CHX/\sqrt{3} & -CHX/\sqrt{3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & CHX/\sqrt{3} & -CHX/\sqrt{3} \\ 0.5 & 0 & 0 & 0.5CHX/\sqrt{3} & 0 & -0.5CHX/\sqrt{3} \\ 0 & 0.5 & 0 & -0.5CHX/\sqrt{3} & 0.5CHX/\sqrt{3} & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 & -0.5CHX/\sqrt{3} & 0.5CHX/\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} iH_a \\ iH_b \\ iH_c \\ iX_a \\ iX_b \\ iX_c \end{bmatrix} \text{----- (11)}$$

(2) 벡터 9

$$\begin{bmatrix} iD_a \\ iD_b \\ iD_c \\ iR_a \\ iR_b \\ iR_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & CHX/\sqrt{3} & -CHX/\sqrt{3} \\ 0 & 1 & 0 & -CHX/\sqrt{3} & 0 & CHX/\sqrt{3} \\ 0 & 0 & 1 & CHX/\sqrt{3} & -CHX/\sqrt{3} & 0 \\ 0.5 & 0 & 0 & 0 & -0.5CHX/\sqrt{3} & 0.5CHX/\sqrt{3} \\ 0 & 0.5 & 0 & 0.5CHX/\sqrt{3} & 0 & -0.5CHX/\sqrt{3} \\ 0 & 0 & 0.5 & -0.5CHX/\sqrt{3} & 0.5CHX/\sqrt{3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} iH_a \\ iH_b \\ iH_c \\ iX_a \\ iX_b \\ iX_c \end{bmatrix} \text{----- (12)}$$

2.1.3 Yg - Y 변압기의 경우

(1) 벡터 0

$$\begin{bmatrix} iD_a \\ iD_b \\ iD_c \\ iR_a \\ iR_b \\ iR_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & CHX & -CHX & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & CHX & -CHX \\ -1 & 0 & 1 & -CHX & 0 & CHX \\ 0.5 & -0.5 & 0 & -0.5CHX & 0.5CHX & 0 \\ 0 & 0.5 & -0.5 & 0 & -0.5CHX & 0.5CHX \\ -0.5 & 0 & 0.5 & 0.5CHX & 0 & -0.5CHX \end{bmatrix} \begin{bmatrix} iH_a \\ iH_b \\ iH_c \\ iX_a \\ iX_b \\ iX_c \end{bmatrix} \text{----- (13)}$$

2.1.4 Δ - Δ 변압기의 경우

(1) Vector 6

$$\begin{bmatrix} iD_a \\ iD_b \\ iD_c \\ iR_a \\ iR_b \\ iR_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -CHX & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -CHX & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -CHX \\ 0.5 & 0 & 0 & 0.5CHX & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0.5CHX & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0.5CHX \end{bmatrix} \begin{bmatrix} iH_a \\ iH_b \\ iH_c \\ iX_a \\ iX_b \\ iX_c \end{bmatrix} \text{----- (14)}$$

2.2 3권선 변압기

3권선 변압기의 등가회로는 그림 2와 같이 표현된다.

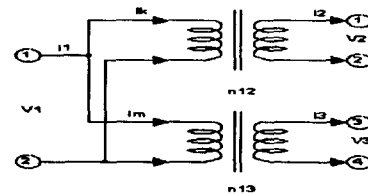


그림 2. 3권선 변압기의 등가회로  
Fig. 2. Equivalent circuit of three-winding transformer.

그림 2로부터 차동전류와 억제전류를 유도하기 위해 사용된 기호들은 다음과 같다.

- $n_{12}$  : 1차측 - 2차측 사이의 권선비
- $n_{13}$  : 1차측 - 3차측 사이의 권선비
- $n_{23}$  : 2차측 - 3차측 사이의 권선비
- $nCT_1$  : 1차측의 CT 비율
- $nCT_2$  : 2차측의 CT 비율
- $nCT_3$  : 3차측의 CT 비율
- $V_1$  : 1차측 선간전압
- $V_2$  : 2차측 선간전압
- $V_3$  : 3차측 선간전압
- $I_1$  : 1차측 전류

- $I_2$  : 2차측 전류
- $I_3$  : 3차측 전류
- $I_{1a,b,c}$  : 1차측에서 각 상의 CT 1차 전류
- $i_{1a,b,c}$  : 1차측에서 각 상의 CT 2차 전류
- $I_{2a,b,c}$  : 2차측에서 각 상의 CT 1차 전류
- $i_{2a,b,c}$  : 2차측에서 각 상의 CT 2차 전류
- $I_{3a,b,c}$  : 3차측에서 각 상의 CT 1차 전류
- $i_{3a,b,c}$  : 3차측에서 각 상의 CT 2차 전류
- $iD_{a,b,c}$  : 각 상의 차동전류
- $iR_{a,b,c}$  : 각 상의 억제전류

먼저 권선비는 식 (15) - 식 (17)과 같이 표현된다.

$$n_{12} = \frac{V_1}{V_2} \text{-----} (15)$$

$$n_{13} = \frac{V_1}{V_3} \text{-----} (16)$$

$$n_{23} = \frac{V_2}{V_3} \text{-----} (17)$$

그리고, 1차, 2차 및 3차측에서 변압기 방향으로의 CT 2차 전류는 1차전류로부터 다음과 같이 표현된다.

$$i_{1a,b,c} = \frac{1}{nCT_1} \cdot I_{1a,b,c} \text{-----} (18)$$

$$i_{2a,b,c} = -\frac{1}{nCT_2} \cdot I_{2a,b,c} \text{-----} (19)$$

$$i_{3a,b,c} = -\frac{1}{nCT_3} \cdot I_{3a,b,c} \text{-----} (20)$$

또한, 각 측의 전류 크기를 match 시키는 계수 CHX는 식 (21) - 식 (23)과 같이 표현된다.

$$CHX_{12} = \frac{1}{n_{12}} \cdot \frac{nCT_2}{nCT_1} \text{-----} (21)$$

$$CHX_{13} = \frac{1}{n_{13}} \cdot \frac{nCT_3}{nCT_1} \text{-----} (22)$$

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

본 논문에서는 두 가지 종류의 3권선 변압기에 대해서 모델을 구현하였다. 첫째는 Yg(1차)-D(2차)-Yg(3차)이고, 또 하나는 Yg(1차)-Yg(2차)-D(3차) 권선방식이다. 그리고 각 측의 위상차는 전자의 경우 1차(0도)-2차(-30도)-3차(0도)이며, 후자의 경우는 1차(0도)-2차(0도)-3차(-30도)를 갖는다. 따라서 이들의 경우에 대해 모두 차동전류 및 억제전류를 구하면 그림 2의 3권선 변압기 등가회로부터 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$I_1 = I_k + I_m \text{-----} (24)$$

또, 권선비는 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$n_{12} = \frac{I_2}{I_k} \text{-----} (25)$$

$$n_{13} = \frac{I_3}{I_m} \text{-----} (26)$$

따라서, 각 측의 모든 전류의 합은 0이 되므로 이로부터 식 (27) 및 식 (28)이 이루어진다.

$$I_1 - I_k - I_m = 0 \text{-----} (27)$$

$$i_1 \cdot nCT_1 + \frac{1}{n_{12}} \cdot nCT_2 \cdot i_2 + \frac{1}{n_{13}} \cdot nCT_3 \cdot i_3 = 0 \text{-----} (28)$$

그리고, 차동전류  $iD$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$iD = i_1 + \left( \frac{1}{n_{12}} \cdot \frac{nCT_2}{nCT_1} \right) i_2 + \left( \frac{1}{n_{13}} \cdot \frac{nCT_3}{nCT_1} \right) i_3 \text{-----} (29)$$

식 (29)를 근거로 하여 각 상의 차동전류와 억제전류 순서치는 위상을 고려하여 구하면 식 (30) 및 식 (31)과 같이 된다.

(1) Yg-D-Yg의 경우

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

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

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

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

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

$$iR_c = \frac{1}{3} \left[ -\frac{1}{\sqrt{3}} (i_{1c} - i_{1b}) - CHX_{12} \cdot i_{2c} - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot CHX_{13} \cdot (i_{3c} - i_{3b}) \right] \text{-----} (30)$$

(2) Yg-Yg-D의 경우

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

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

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

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

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

$$iR_c = \frac{1}{3} \left[ \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{1c} - i_{1b}) - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot CHX_{12} \cdot (i_{2c} - i_{2b}) - CHX_{13} \cdot i_{3c} \right] \text{-----} (31)$$

한편 그림 3은 변압기 차동보호계전기의 Trip 영역을 설명해 주고 있다. 이 그림에서 차동전류( $I_d$ )가 억제전류( $I_r$ )와 상수  $k$ 로부터 구해지는 일정한 크기 이상이 되면 Trip 하게 된다. 그림 3에서 일반적으로 Slope는 20%, 30% 및 40%를 정하게 된다.

### 3. 변압기 및 보호계전기의 그래픽 모델 구성

#### 3.1 2권선 변압기

4 종류의 2권선 변압기에 대해서 차동전류와 억제전류를 표현하기 위한 모델들을 MATLAB내에서 Simulink과 Power System Blockset Library를 이용하여 각각 구성하였으며, 여기서는 그림 4와 같은 Yg- $\Delta$  변압기의 경우만을 제시하였다. 그림 4에서 보여주고 있는 여러 가지의 Block중 변압기 모델 부분은 시험 대상에 따라 이미 구성된 모델을 바꾸어 주므로 쉽게 처리될 수 있으며, 본 논문에서는 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

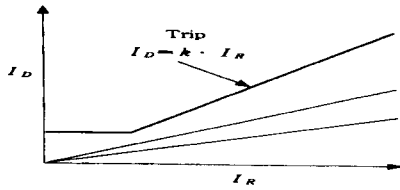


그림 3. 변압기 차동보호계전기의 Trip 영역.  
Fig. 3. Slop of the percentage differential characteristic.

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, calcus 및 DEMUX의 세 Block으로 Subsystem이 구성되어 있으며, 이중 calcus는 Simulink Library중 S-functions을 연산하는 Block이다. 여기에서 변압기 양측의 6개 전류가 입력되며 이 전류들은 식 (1) - 식 (14)까지의 과정을 거쳐 차동전류와 억제전류의 크기와 형태들을 변압기의 종류 및 벡터그룹에 따라 선택하여 제시한다.

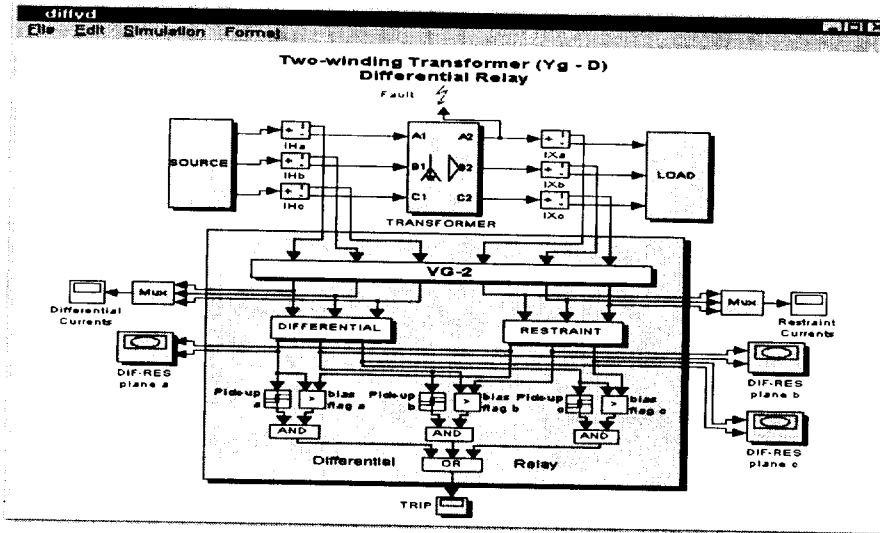


그림 4. 2권선 변압기 차동보호계전기의 동작 원리 표현을 위한 그래픽 모델.  
Fig. 4. Graphical model for operational principle of two-winding transformer differential relay.

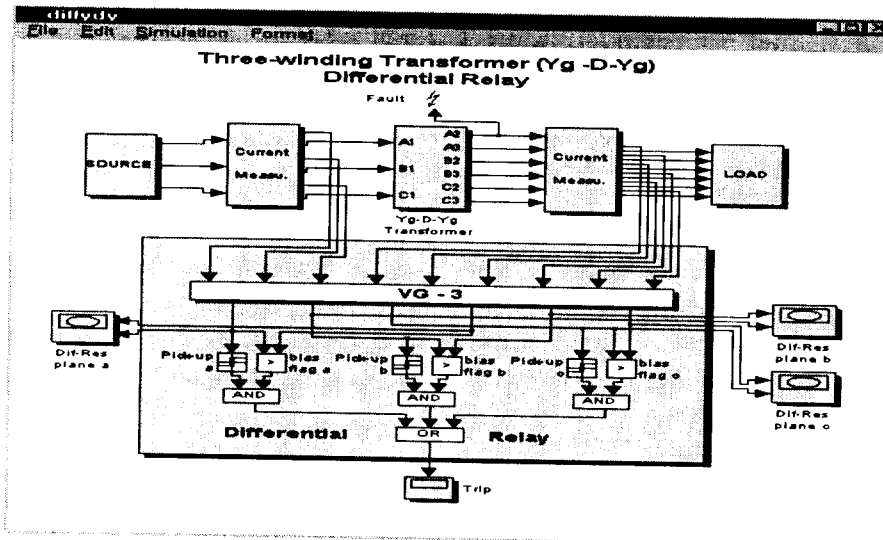


그림 5. 3권선 변압기 차동보호계전기의 동작 원리 표현을 위한 그래픽 모델.  
Fig. 5. Graphical model for operational principle of three-winding transformer differential relay.

나. Fault

Fault는 전체 시뮬레이 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 메뉴 방식으로 데이터를 입력할 수 있다.

3.2 3권선 변압기

두 종류의 3권선 변압기에 대해서 차동전류와 억제전류를 표현하기 위한 모델들을 MATLAB내에서 Simulink와 Power System Blockset Library를 이용하여 그림 5과 같이 구성하였다. 여기서는 Yg(1차)-D(2차)-Yg(3차) 권선방식의 변압기에 대해서만 제시하기로 한다. 본 모델에서 중요한 Block들을 살펴보면 다음과 같다

가. Transformer

변압기 Block의 Subsystem은 권선의 접속형태를 보여주고 있으며 이 Subsystem 내에서 Fault Block을 포함시켜 자유롭게 고장지점과 접속시켜 각종 내부고장을 시험할 수 있도록 구성하였다.

나. VG-3

그림 6에서 보여주고 있는 VG-3 Block은 3권선 변압기의 벡터그룹(Vector Group)을 의미하기 위해 VG-3를 사용하였으며 Subsystem은 MUX, trthree 및 DEMUX의 세 Block으로 구성되어 있는데, 그 중 S-Function Block인 trthree에서는 Code화 된 프로그램을 통해 전류 및 전압들의 입력치와

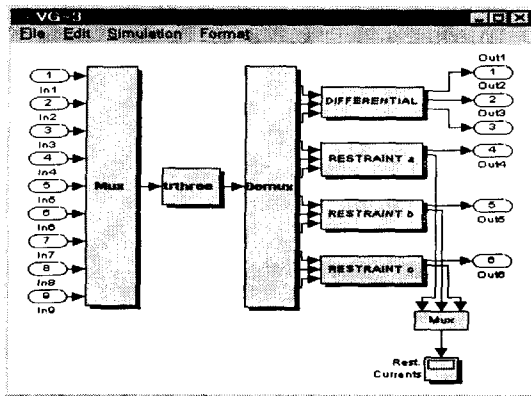


그림 6. VG-3 Block의 Subsystem.

Fig 6. Subsystem of VG-3 Block.

권선방식의 선택과 같은 여러 데이터로부터 각 상의 차동전류와 억제전류를 구하게 된다. 또한 VG-3 Block에는 trthree에서 구한 차동전류와 억제전류를 입력치로 하여 DIFFERENTIAL와 RESTRAINT a, RESTRAINT b 및

표 2. 시험에서 사용된 입력자료.

Table 2. Input data used for test.

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
Yg-Y	345	389.8	0.003	0.09	500	500	1,196	50	2,000:5	2,000:5
D-D	345	500	0.003	0.09	500	500	500	60	10,000:5	600:5

RESTRAINT c의 Block에서 각각 차동전류와 억제전류의 크기와 위상각을 구한다. 그리고 이 Block에서 차동전류와 억제전류의 고장전후 순시치가 Display된다. VG-3 Block도 변압기 종류와 각종 전압과 CT Ratio등을 입력할 수 있는 Masked Block을 Subsystem으로 가지고 있다.

한편 Differential Relay Block은 Block 내부에 있는 요소들이 차동보호계전기의 기능을 갖고 있는 것을 나타내기 위한 표시이다. 여기서 Pick-up은 보호계전기 Trip을 위한 Pick-up 전류의 한계 값을 입력하는 Block이며, Dif-Res는 각 상별로의 차동전류와 억제전류의 크기를 X-Y Plane에서 보여주는 기능을 가진 Block이다.

4. 시험 및 결과

4.1 2권선 변압기

시험을 위해 선정한 각 변압기마다의 입력자료는 표 2에서 보여주고 있으며, 표 3은 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 7 - 그림 11는 그림 4의 모델에서 Yg-△ 변압기 내부고장(X측 a상 지락)이 0.1초에서 발생하였을 경우에 대한 시뮬레이션 과정에서 각 상의 차동전류와 억제전류의 순시치, DIFFERENTIAL Block 내에서의 결과 및 X-Y Plane a에서의 결과와 함께 Trip 결과를 보여주고 있다. Trip의 경우에서 크기가 0이면 No Trip이며 1.0이면 Trip 하였음을 의미한다.

그림 7에서 차동전류는 a,b,c상 모두 고장 순간 이전에서는 0이었다가 고장 순간부터 b,c 상을 제외한 a상은 큰 차동전류를 보이고 있다. 한편 그림 8에서는 고장전에는 a,b,c상 모두 일정한 억제전류를 보이다가 고장순간부터 많은 억제전류가 흐르는 것을 알 수가 있다. 또한 그림 9에서와 같이 DIFFERENTIAL Block에서는 차동전류의 Magnitude 및 Phasor가 구해지며 그 최종 값이 Display된 것을 볼 수가 있다. 그리고 RESTRAINT Block에서는 Slope 값으로 30%를 주었으며 a상의 크기만을 X-Y Plane에서 보이면 그림 10과 같이 나타난다. 그림 11은 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 7 - 그림 11에서 보여준 Yg-△ 변압기 차동보호계전기에 대한 결과 뿐만 아니라 다른 세 종류에 대해서도 시뮬레이션을 수행하여 좋은 결과를 얻었으나 본 논문에서는 생략한다.

표 3. 시험결과.

Table 3. Test results.

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
Yg-Y	내부	X	0	c	0.04	13.75	13.77	8.52	14.67	14.13	Yes
	외부	H	0	a	0.04	0.03	0.03	8.53	8.17	9.46	No
D-D	내부	X	0	a-b	0.05	20.71	0.05	12.74	10.36	11.28	Yes
	내부	X	0	b	0.05	20.77	0.05	12.73	10.39	11.32	Yes
	외부	H	0	c	0.05	0.05	0.05	7.08	7.08	7.09	No

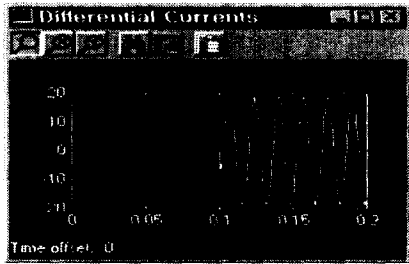


그림 7. 차동전류.  
Fig. 7. Differential currents.

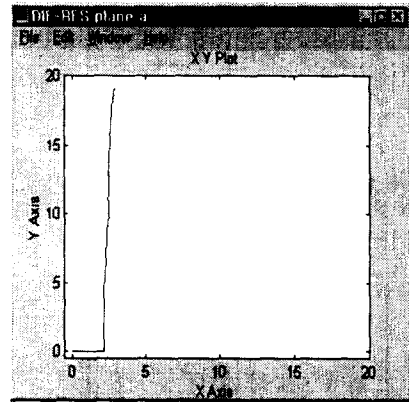


그림 10. X-Y Plane a의 결과.  
Fig. 10. Result on X-Y Plane a.

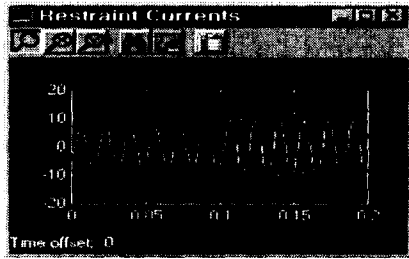


그림 8. 억제전류.  
Fig. 8. Restraint currents.

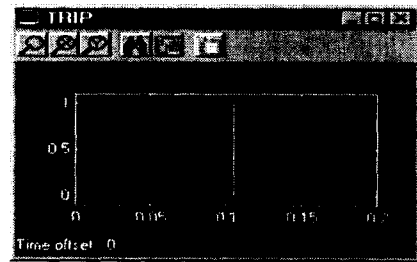


그림 11. Trip 결과.  
Fig. 11. Trip result.

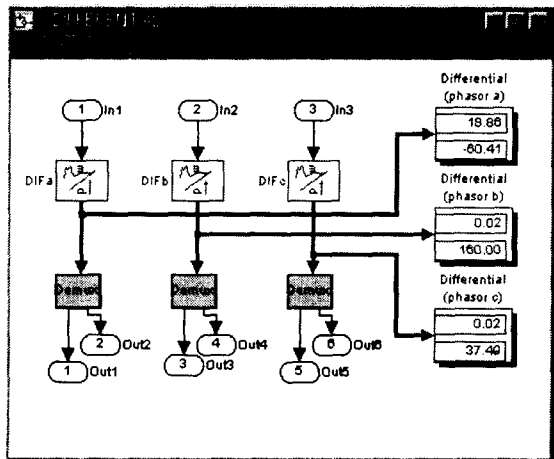


그림 9. DIFFERENTIAL Block에서의 결과.  
Fig. 9. Result in DIFFERENTIAL Block.

4.2 3권선 변압기

시험을 위해 선정한 3권선 변압기의 입력자료는 표 4와 같다. 그리고 표 5는 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 12-15는 그림 5의 모델에서 대표적으로 변압기 내부 고장(2차측 a상(A2) 지락고장)이 0.1초에서 발생하였을 경우, 이에 대한 시뮬레이션 과정에서 각 상의 차동전류와 억제전류의 순시치 및 크기, 그리고 RESTRAINT a Block 내에서의 결과 및 Trip 결과를 보여주고 있다.

그림 12에서의 같이 RESTRAINT a Block에서는 차동전류와

억제전류의 크기 및 위상이 구해지며 그 최종 값이 Display된 것을 볼 수가 있다. 그림 13에서 차동전류는 a,b,c상 모두 고장 순간 이전에서는 0이었다가 고장 순간부터 b,c 상을 제외한 a상은 큰 차동전류를 보이고 있다. 한편 그림 14에서는 고장 전에서는 a,b,c상 모두 일정한 억제전류를 보이고 있다가 고장 순간부터 많은 억제전류가 흐르는 것을 알 수가 있다. 또한 한편 그림 15는 Trip 결과를 보여주고 있다. Pick-up에서 동작 한계치를 입력할 수 있는데 여기서는 0.3[A]로 입력하였으며 고장 후 바로 1.0을 보이는 것을 볼 때 고장 직후에 바로 Trip 되었음을 알 수가 있다. 또한 그림 16과 그림 17은 외부 고장(1차측 c상(C1) 지락고장)이 발생하였을 경우의 차동전류와 Trip 결과를 보여주고 있다. 외부고장이므로 차동전류는 모두 고장 전후가 동일한 값을 갖고 있으며, 고장직후에도 계속 0을 유지하고 있어 Trip 되지 않았음을 알 수 있다. 3권선 변압기에 대해 본 논문에서 보여준 시험 외에 다른 고장시에도 좋은 결과들을 보여주었다.

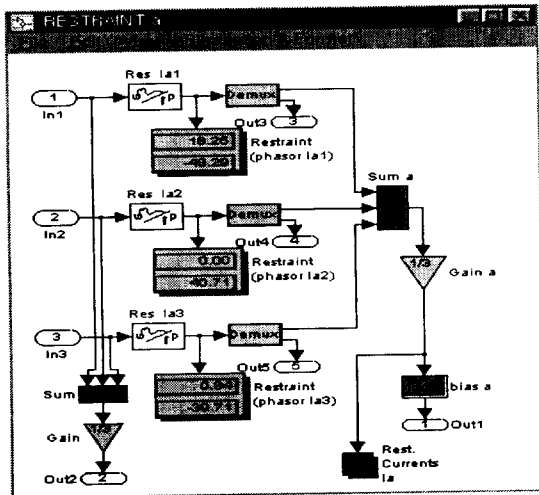


그림 12. RESTRAINT a Block의 결과.  
Fig. 12. Result in RESTRAINT a Block.

표 4. 시험에서 사용된 입력자료.  
Table 4. Input data used for test.

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
Yg-Yg-D	735	315	25	0.0025	0.1	500	500	300	60	40:5	90:5	140:5

표 5. 시험결과.  
Table 5. Test results.

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
Yg-Yg-D	(0도)-(0도)-(-30도)	내부	B2	0.02	26.49	26.48	4.92	11.6	9.28	Yes
		내부	B3	0.02	2.48	0.02	5.27	5.18	5.24	Yes
		내부	C2	25.98	0.02	25.99	9.10	4.94	11.4	Yes
		외부	A1	0.02	0.02	0.02	4.92	4.92	4.92	No

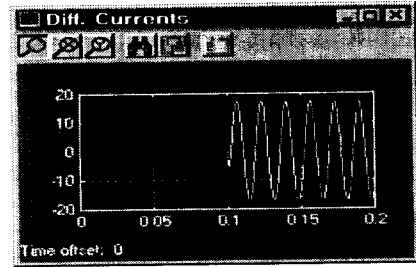


그림 13. 차동전류.  
Fig. 13. Differential currents.

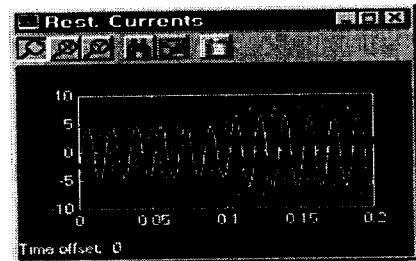


그림 14. 억제전류.  
Fig. 14. Restraint currents.

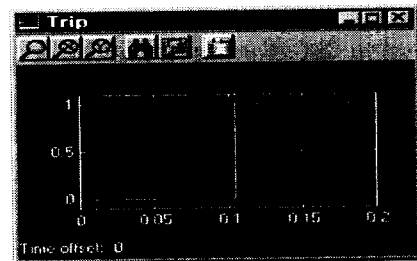


그림 15. Trip 결과.  
Fig. 15. Trip result.

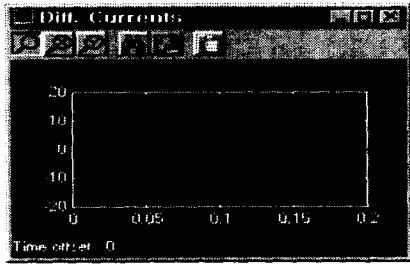


그림 16. 차동전류(C1외부 지락고장).  
Fig. 16. Differential currents.

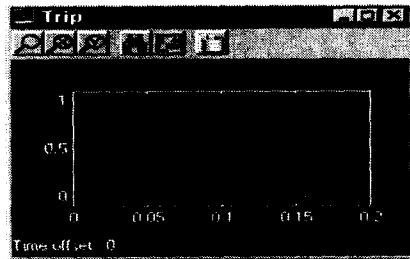


그림 17. Trip 결과(C1외부 지락고장).  
Fig. 17. Trip result.

### 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 시험결과들은 학부 및 대학원 그리고 전력회사나 일반회사에서 전력계통 및 보호관련자들의 교육 과정에서 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.

### 감사의 글

본 논문은 1997년도 주산재단의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- [1] Stanly 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.

### 저 자 소 개



#### 이 종 범(李鍾範)

1955년 7월 12일생. 1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1987~1990년 한국전기연구소 지중송전연구실 실장. 1993년 독일 Berlin 공대 연구교수. 1995년 영국 City University 연구교수. 1997-1998년 미국 Texas A&M University 객원교수. 현재 원광대 공대 전기·전자공학부 교수