

거리 계전기의 EMTP 모델링에 관한 연구

심재철, 유창완, 강유원, 임화영
 광운대학교 제어계측공학과

A Study on Distance Relay Modeling Using EMTP

Shim Jae-Chul, Ryu Chang-Wan, Kang Yu-Won, Yim Wha-Yeong
 Dept. of Control and Instrumentation Eng. Kwang-Woon University

Abstract - This paper presents a relay modeling technique to deal with the relay transient characteristics. Existing relay models are based on steady-state concepts. The ninth-order state space mathematical model of the Mho distance relay has been constructed.

Computer modeling of a typical distance relay is done within the Transient Analysis of Control System(TACS) subsection of the ElectroMagnetic Transient Program(EMTP).

1. 서 론

거리 계전(Distance Relaying) 방식은 고속 동작이 가능하고 계통 전원용량의 변동에 따른 영향이 적어서 적용이 용이하기 때문에 송전선 보호에 사용이 되고 있다.

거리 계전 방식은 변성기(Potential Transformer)와 변류기(Current Transformer)를 통해서 얻어진 순시 전압과 전류 값을 이용해서 임피던스를 구하고 이의 수렴여부를 판정하여 이에 따르는 가공선로 상의 고장점까지의 거리를 추정하는 방식으로 본 논문에서는 전형적인 Mho 거리 계전기를 EMTP를 이용하여 모델링하였다.

이 모델은 PT와 CT로부터 이들의 과도 응답을 계산하는데 있어서 임의의 과형을 입력으로 받아들일 수 있기 때문에 계전기의 실제 동특성을 얻을 수 있다. 전형적인 Mho 거리 계전기의 상태 공간 모델을 시뮬레이션하기 위해서 수학적 모델[1]을 사용하였고, 제어계의 과도현상 해석 프로그램인 TACS를 EMTP와 연계하여 사용하였다. 전력시스템과 제어시스템을 결합시켜 사용하는 hybrid EMTP-TACS 기능을 이용하여 전기회로와 TACS 사이에 신호들을 전달시킬 수 있도록 하였다.

2. 본 론

2.1 계전기의 수학적 모델

전형적인 Mho 거리 계전기를 <그림 1>에 나타내었다.

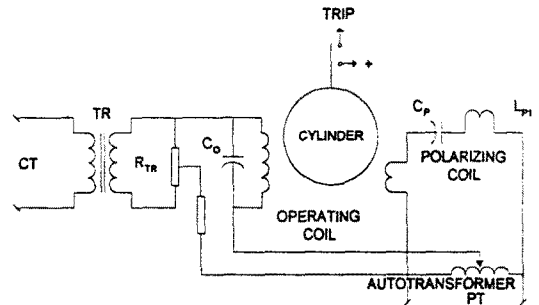


그림 1. Mho 거리 계전기의 구성도
 Fig. 1. Schematic Connections of a Typical Mho Distance Relay

이 계전기는 두 개의 코일 : 극성 코일(polarizing coil)과 동작 코일(operating coil)을 지니고 있다. 극성 코일은 가변 인덕터 L_{P1} 와 커패시터 C_P 로 구성된 PT에 연결되어 있고, 동작 코일은 transactor TR (임피던스 설정용 특수 변압기)를 거쳐 CT에 연결되어 있다. autotransformer PT는 동작 코일을 구동시키는 역할을 한다. 두 개의 코일에 흐르는 전류의 상호 작용이 전자기적인 구동력(electromagnetic torque)을 발생시킨다.[2] 그 토크가 정확한 방향 / 크기 / 지속시간을 갖는 경우에, 계전기는 트립을 하게된다 (<그림 2> 참조). <그림 2>는 릴레이의 정상 상태 임피던스 특성을 보여준다. 임피던스 세팅의 크기 Z_{set} 는 전위차계(potentiometer) R_{TR} 또는 transactor TR와 autotransformer AT의 탭을 변경시켜서 조절해줄 수 있다. 최대 토크의 각(α)은 가변 인덕터(L_{P1})를 조정해서 맞출 수 있다. 계전기의 임피던스를 맞추어주기 위해서는 tripping circle의 크기와 방향을 조정해주면 된다.

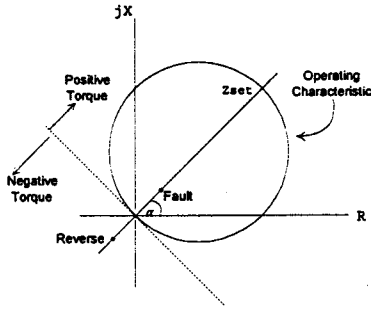


그림 2. 릴레이의 정상 상태 동작 특성
Fig. 2. Steady-State Characteristic of The Relay

2.2 EMTP와 TACS

EMTP는 전력 시스템뿐만 아니라 그 구성 요소들까지 표현할 수 있도록 만들어진 시뮬레이션 프로그램이다. EMTP는 전력계통 해석 도구, TACS (Transient Analysis of Control Systems) 모델링 테크닉 및 이러한 것들을 집약하기 위한 인터페이스 기능들로 구성되어 있다.

모델링에 사용된 TACS는 제어계 해석 프로그램으로 전력 시스템의 소자와 제어 시스템 사이의 동적 상호 작용을 시뮬레이션하기 위해 만들어졌다. 이를 위하여 하이브리드 EMTP-TACS 상호 구성을 이루어 EMTP의 전기 회로 변수와 TACS의 제어 신호를 인터페이스 하도록 한다. 따라서 노드에서의 전압, 스위치를 통해서 흐르는 전류와 같은 회로 변수들은 TACS로 보내지며, TACS는 스위치 동작 또는 컨버터 밸브의 점호를 위해 신호를 교대로 보낸다. 제어계통은 일반적으로 다양한 여러 가지 기본적인 요소와 함수로 구성된 블록 선도로 표시할 수 있다. 그러므로 TACS에서는 블록 선도로 구성된 제어 계통을 1계 미분 연립방정식으로 구성하여 사다리꼴 적분법(Trapezoidal Rule)을 이용하여 시간 영역에서 해석하게 된다.

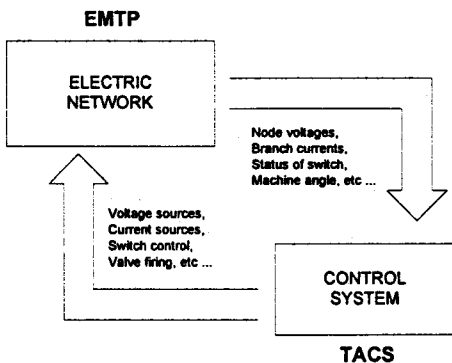


그림 3. EMTP와 TACS의 연결관계
Fig. 3. Interaction of EMTP and TACS

<그림 3>은 EMTP와 TACS와의 연관 관계를 나타낸 것이다.

2.3 계전기의 모델링과 시뮬레이션

EMTP(TACS)에서 릴레이의 상태 공간 모델을 구성하기 위하여 참고 문헌[1]에서 구해진 수학적 모델을 확장하여 적용하였다.

<그림 1>을 바탕으로 한 Mho 거리 계전기의 9차 상태공간 동적 시스템은 다음 식과 같다. [3, 4]

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ (9 \times 1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ (9 \times 9) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ (9 \times 1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ (9 \times 3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ (3 \times 1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Y = \begin{bmatrix} C \\ (1 \times 9) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ (9 \times 1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Y = \begin{cases} 1 \text{ (Trip)}, & X_8 \geq \theta_1 \\ 0 \text{ (Non-trip)}, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

식 (3)에서 출력 X_8 이 θ_1 보다 같거나 큰 경우에 트립이 발생되게 되며, 여기서 각 행렬에서 영이 아닌 요소들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a_{11}x_1 + a_{13}x_3 + b_{11}u_1 + b_{12}u_2 \\ \dot{x}_2 &= a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + b_{31}u_1 \\ \dot{x}_3 &= a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 \\ \dot{x}_4 &= a_{45}x_5 \\ \dot{x}_5 &= a_{54}x_4 + a_{55}x_5 + b_{51}u_1 \\ \dot{x}_6 &= a_{64}x_4 + a_{65}x_5 + a_{66}x_6 + b_{61}u_1 \\ \dot{x}_7 &= a_{72}x_2 + a_{73}x_3 + a_{77}x_7 \\ \dot{x}_8 &= a_{89}x_9 \\ \dot{x}_9 &= a_{98}x_8 + b_{93}u_3 \end{aligned} \quad (4)$$

[A]와 [B] 행렬은 릴레이 자체의 전기·기계적 파라미터에 의존하는 상수 행렬들이며, 다음은 이 행렬들의 영이 아닌 요소들을 열거한 것이다.

$$\begin{aligned} a_{11} &= -K_2[R_{TR2} + (1-i)R_{TR} + K_1tR_{OC}R_{TR}] \\ k_1 &= [R_{OC} + (1-i)R_{TR}]^{-1}, \quad k_2 = [L_{TR} + L_{TR2}]^{-1} \\ a_{13} &= k_2[1 - k_1R_{OC}], \quad a_{22} = -R_O/L_O \\ a_{23} &= 1/L_O, \quad a_{31} = -k_1tR_{TR}/C_O \\ a_{32} &= -1/C_O, \quad a_{33} = -k_1/C_O \\ a_{45} &= 1/C_P, \quad a_{54} = -1/(L_P + L_{P1}) \\ a_{55} &= (R_P + R_{P1})a_{54}, \quad a_{64} = -4N_P/\pi r T(L_P + L_{P1}) \\ a_{65} &= (R_P + R_{P1})a_{64} \\ a_{66} &= -rR_C h(1+2r)/\mu_0 \pi r^2 Tl \\ a_{72} &= -4N_O R_O/\pi r T L_O \\ a_{73} &= -a_{72}/R_O, \quad a_{77} = a_{66} \\ a_{89} &= 1, \quad a_{98} = -K_S/J \\ B_{11} &= -P_X a_{13}, \quad B_{12} = K_2 L_{TR} \\ B_{31} &= K_1 P_X / C_O, \quad B_{51} = -a_{54} \\ B_{61} &= -a_{64}, \quad B_{93} = 1/J \end{aligned}$$

또한, 각 파라미터의 값과 의미는 다음과 같다.

- x_1 = 변압기의 2차측에 흐르는 전류
- x_2 = 동작 코일에 흐르는 전류
- x_3 = 동작 코일에 걸리는 전압
- x_4 = memory circuit내의 커패시터에 걸리는 전압

x_5 = 분극 코일에 흐르는 전류
 x_6 = 분극 코일에 의해 유도된 전류의 최대밀도
 x_7 = 동작 코일에 의해 유도된 전류의 최대밀도
 x_8 = 실린더의 각 변위 ($x_8 \geq 0$)
 x_9 = 실린더의 각 속도
 u_1 = PT로부터의 입력 전압
 $u_2 = di/dt$ (i : CT로부터의 입력 전류)
 $u_3 = 8\mu_0 r^2 T I (N_0 X_2 X_6 - N_p X_3 X_7) / 3h$, (전자력)
 L_p = 분극 코일의 인덕턴스, 6h
 R_p = 분극 코일의 저항, 665.4 Ω
 C_p = 분극 회로내의 커패시터, 0.75 μ f
 L_{p1} = 분극 회로내의 가변 인덕터, 4h
 R_{p1} = 가변 인덕터의 저항, 269.7 Ω
 P_x = autotransformer의 탭
 L_o = 동작 코일의 인덕턴스, 2.5h
 R_o = 동작 코일의 저항, 214.1 Ω
 C_o = 동작 코일의 커패시터, 2 μ f
 R_{oc} = 억제 저항, 700 Ω
 R_{TR} = potentiometer, 750 Ω
 t = potentiometer의 ratio
 R_{TR2} = transactor의 2차 저항, 82.8 Ω
 L_{TR2} = transactor의 2차 누설 인덕턴스, 1.5h
 K_s = 스프링의 탄성계수, 2.829×10^5 kgm
 J = 실린더의 관성 모멘트, 4.226×10^{-6} kgm²
 R_c = 실린더 재질의 고유 저항, 10^{-7} Ω m
 μ_0 = 공기의 투과율, $4\pi \times 10^{-7}$
 N_p = 분극 코일의 권선수, 9000
 N_o = 동작 코일의 권선수, 4000
 n = air gap의 전체 길이, 2mm
 l = 실린더의 길이, 35mm
 r = 실린더의 반지름, 14mm
 T = 실린더 벽의 두께, 1mm

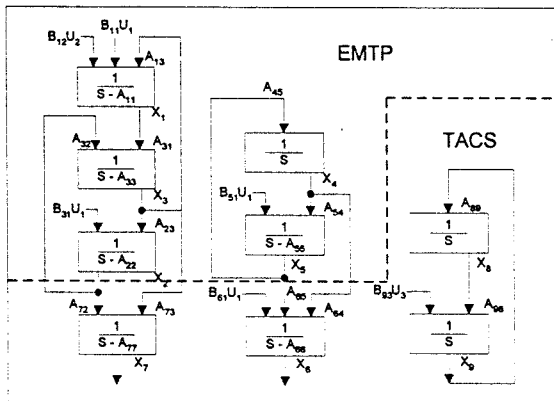


그림 4. EMTP와 TACS로 구분된 릴레이 모델
 Fig. 4. Relay Block Diagram of EMTP and TACS Utilization

TACS의 입력 형태로 만들기 위해 (4)식의 라플라스 전달 함수를 사용하였으며, 라플라스 변환을 위해 초기 조건을 영으로 설정하였다.

EMTP와 TACS를 사용하기 위한 계전기 블록 선도 <그림 4>에서 보듯이 릴레이 모델을 두 단계

로 나누었다. EMTP라고 표시된 첫 번째 단계는 <그림 1>의 전기회로에 해당하는 부분이고, TACS라고 표시된 두 번째 단계는 <그림 1>에서 실린더 부분을 나타낸 것이다.

X1에서 X5의 초기 조건은 EMTP에서 계산되어 TACS 블록으로 들어가고, X6에서 X9까지는 TACS의 77-Cards를 써서 TACS에서 초기화시켰다. <그림 4>에서 볼 수 있듯이 계전기는 하나의 출력 (X_8)만을 가지고 있는데, 이는 계전기 동작을 제어하게 되는 실린더의 각 변위를 나타내는 것이다. 미리 정해진 정상 상태 조건에 대해 릴레이를 테스트하기 위해서 prefault current는 영으로 하였고, PT 전압은 $V_{pt} = 120 \cos(\omega t + 90^\circ)$ 이고, $I_{ct} = 0$ [A] 로 하였다.

시뮬레이션은 다음 두 가지의 고장 조건을 연구 대상으로 하였다. 첫 번째 고장은 reverse fault로 이는 릴레이의 동작 특성의 바깥 부분에서 발생한 고장을 나타내는 것이며, PT 전압은 $V_{pt} = 50 \cos(\omega t - 30^\circ)$ 이고, CT 전류는 $I_{ct} = 20 \cos(\omega t + 90^\circ)$ 이다. 두 번째 고장은 forward fault인데, 이는 <그림 2>에서 "Fault"라고 표시된 동작 특성 내의 고장을 나타내는 것이다. 이때의 PT 전압은 $V_{pt} = 50 \cos(\omega t + 60^\circ)$ 이고, CT 전류는 $I_{ct} = 20 \cos(\omega t + 0^\circ)$, 주파수는 $f = 60$ Hz 이다.

3. 결 론

전형적인 Mho 거리 계전기의 수학적 모델링을 EMTP(TACS)를 이용하여 구현하였다. EMTP를 사용함으로써 전력 시스템뿐만 아니라 그 구성 성분들까지도 나타낼 수 있었다. 이 모델은 변류기로부터 과형을 받아들일 수 있기 때문에 계통 사고 시 계전기의 과도 특성을 잘 반영해주며, 이러한 계전기 모델과 시뮬레이션을 통하여 계전기의 실험을 보다 신속하고 정확하게 수행할 수 있게된다.

참고 문헌

- [1] T.C Cheng, C.Y. Wu, T.S. Ning, M.S. Si, Z. Peng, "A Dynamic State Space Model of MHO Distance Relay," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 12, Dec. 1985, pp.3558-3564
- [2] William H. Hayt, Jr., "Engineering Electromagnetic," Fourth Edition, McGrawHill, 1981
- [3] William L. Brogan, "Modern Control Theory," Quantum Publishers, Inc., 1974
- [4] S.M. Shinnars, "Modern Control System Theory and Application," Addison-Wesley Publishing Company, 1972