

電流力計型 繼電器의 故障電流중 直流 電流分에 의한 動作特性

論 文
27~6~2

The Dynamic Performance of a Electro-Dynamometer type Protective Relay for the D.C Component in the Fault Current

李 載 仁*
(Jai In Lee)

Abstract

An analytical investigation has been carried out for the motion of moving element in electro-dynamometer type directional power relay under A.C source.

For the more a time dependent kinetic performance of the element can also be deduced for the D.C component in fault current.

The results obtained thus for show that, in the relay with stopper, the performance time for the equal D.C and A.C component can be shorten ca. 0.5Hz in comparison with the fact, the performance time exhibits to delay ca. 0.75Hz under the same conditions for the case of the relay without stopper, it appear that these differences of performance times will not give rise any difficulties for the aspects of practical case, however, the obtain results can be applicable in the course of the design of the relay.

1. 서 론

電力系統의 안전한 운동을 하기 위하여 되도록 고장 시간을 짧게 할 필요성이 있으므로 繼電器나 遮斷器의 동작을 고속화하여 遮斷時間이 1~2[cycle]의 것이 널리 쓰이나 고장 발생시 過渡的으로 생기는 고장 電流중 直流分에 의하여 誤動作¹⁾하는 경우가 있는가 의심하여 보았다. 그리하여 본 論文은 비교적 해석이 용이한 電流力計型 電力方向繼電器를 선택하여 可動部의 운동상태를 Laplace변환을 이용하여 해석하고 直流分の 電流가 흐를 때 動作時間特性을 고찰하여 보았으며 이 결과를 실제의 設計에도 이용할 수 있으리라 믿는다.

2. 기본 방정식

電流力計型 方向繼電器의 電壓 코일의 電壓을 e_p , 電流 코일의 電流를 i_c 라 하고, i_c 의 直流分을 I_d , 交 流分을 I_m 라 하고 시간전 감쇄를 고려치 않으면

$$e_p = E_m \sin(\omega t + \phi)$$

$$i_c = I_m \sin(\omega t + \theta) + I_d$$

로 표시할 수 있으며 電壓 코일(可動코일)에는 일정한 電壓을 상시 인가하고 電流를 i_c 라 하면, 驅動 토크 τ_e 는

$$\tau_e = K' i_c i_p^{(2)}$$

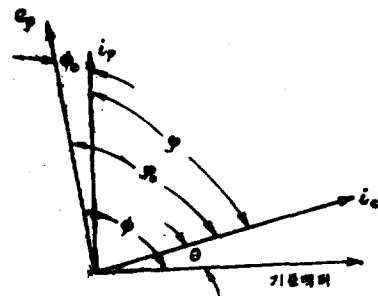


그림 1. 電壓, 電流벡터도

Fig 1. Voltage and current vector diagram

*正會員; 漢陽大 工大 電氣工學科教授
接受日字; 1978年 9月 5日

로 되며, 그림 1에서 電壓 코일의 임피던스角을 ϕ_0 , $\phi - \theta = \varphi_0$ 라 하면

$$\begin{aligned} \tau_e &= K' I_p m \sin(\omega t + \phi - \phi_0) \{ I_m \sin(\omega t + \theta) + I_d \} \\ &= \frac{1}{2} K' I_p m I_m (\cos(\varphi_0 - \phi_0) - \cos(2\omega t + \phi + \theta - \phi_0)) \\ &\quad + K' I_p m I_d \sin(\omega t + \phi - \phi_0) \end{aligned}$$

로 되며, ϕ_0 는 電壓 코일의 리액턴스가 작으므로 대단히 작은 각이 되며 무시할 수 있고, I_p 를 E_m 으로 바꿔 쓰면

$$\begin{aligned} \tau_e &= \frac{1}{2} K E_m I_m \{ \cos \varphi - \cos(2\omega t + \Psi) \\ &\quad + 2\alpha \sin(\omega t + \phi) \} \end{aligned} \quad (1)$$

이고

$$\Psi = \phi + \theta \text{ 및 } \alpha = \frac{I_d}{I_m} \text{이다.}$$

다음에는 可動部의 동작각도를 ϕ_c , 각 속도를 ω_c , 관성 모멘트를 J , 댐핑 토오크를 τ_d , 제어 토오크를 τ_r 라 하고, 정지상태 즉 $\phi_c = 0$ 에서 제어 스프링이 可動部에 작용하는 토오크를 τ_{r0} 라 하면 運動方程式³⁾은

$$J \frac{d^2 \phi_c}{dt^2} = \tau_e - (\tau_d + \tau_r + \tau_{r0})$$

τ_e 는 식 (1)에 표시하였으며, 또

$$\tau_d = K_a \frac{d\phi_c}{dt}, \quad \tau_r = K_b \phi_c, \quad \tau_{r0} = K_c \text{로 놓을 수}$$

있으므로 (K_a, K_b, K_c 는 정수)

$$\begin{aligned} J \frac{d^2 \phi_c}{dt^2} + K_a \frac{d\phi_c}{dt} + K_b \phi_c \\ = \frac{1}{2} K E_m I_m \{ \cos \varphi - \cos(2\omega t + \Psi) \\ + 2\alpha \sin(\omega t + \phi) \} - K_c \end{aligned} \quad (2)$$

로 되고, 식 (2)를 Laplace 변환하여 $L(\phi_c) = \Phi_c$ 라 하고, 초기조건 $\phi_{c0} = \phi'_c = 0$ 을 대입하면

$$\begin{aligned} (S^2 J + S K_a + K_b) \Phi_c \\ = \frac{1}{2} K E_m I_m \left[\frac{\cos \varphi}{S} - \frac{S \cos \Psi - 2\omega \sin \Psi}{S^2 + 4\omega^2} \right. \\ \left. + 2\alpha \frac{\omega \cos \phi + S \sin \phi}{S^2 + \omega^2} \right] - \frac{K_c}{S} \end{aligned} \quad (3)$$

가 되며, 식 (3)을 L^{-1} 변환하여 정돈하면

$$\begin{aligned} \phi_c &= \frac{1}{2} \frac{K}{J} \frac{E_m I_m}{2} \left[t^2 \left\{ \cos \varphi - \frac{1}{2\omega} \frac{K_a}{J} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. (\sin \Psi + 4\alpha \cos \phi) + \frac{1}{4\omega^2} \left(\frac{K_a^2}{J^2} - \frac{K_b}{J} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. (-\cos \Psi + 8\alpha \sin \phi) \right\} + \frac{t}{\omega} \left\{ (\sin \Psi + 4\alpha \cos \phi) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{1}{2\omega} \frac{K_a}{J} (-\cos \Psi + 8\alpha \sin \phi) \right\} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2\omega^2} \left\{ \cos \Psi - \cos(2\omega t + \Psi) \right\} \right. \\ &\quad \left. + \frac{8\alpha}{2\omega^2} \left\{ \sin \phi - \sin(\omega t + \phi) \right\} \right] - \frac{1}{2} \end{aligned}$$

$$\frac{K_c}{J} t^2 \quad (4)$$

로 된다.

식 (1)의 ϕ_c 에 接點 閉路時의 回轉角 ϕ_{cf} 를 대입하고, 시간 t 에 관해서 풀면 동작시간 t_c 를 구할 수 있다. 즉

$$\begin{aligned} A &= 2 \phi_{cf} / \left(\frac{K}{J} \frac{E_m I_m}{2} \right) \\ B &= \frac{K_c}{J} / \left(\frac{K}{J} \frac{E_m I_m}{2} \right) \end{aligned}$$

라 놓으면, 다음 3개의 근사식이 유도된다. 여기서 $t \gg \frac{1}{\omega}$ 라 하고 식 (4)의 $\frac{1}{2\omega^2}$ 의 계수를 포함하는 항을 생략하면

$$\begin{aligned} t^2 \left\{ (\cos \varphi - B) - \frac{1}{2\omega} \frac{K_a}{J} (\sin \Psi + 4\alpha \cos \phi) \right. \\ \left. + \frac{1}{4\omega^2} \left(\frac{K_a^2}{J^2} - \frac{K_b}{J} \right) (-\cos \Psi + 8\alpha \sin \phi) \right\} \\ + \frac{t}{\omega} \left\{ (\sin \Psi + 4\alpha \cos \phi) - \frac{1}{2\omega} \frac{K_a}{J} \right. \\ \left. (-\cos \Psi + 8\alpha \sin \phi) \right\} - A = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

또 電力系統의 고장시 過渡의 으로 발생하는 直流分의 電流는 交流分과 같거나, 크다고 보아도 최대로 α 는 2정도가 되겠으며 α 및 $\frac{1}{\omega^2}$ 을 전다고 보면

식 (5)는

$$\begin{aligned} t^2 \left\{ (\cos \varphi - B) - \frac{1}{2\omega} \frac{K_a}{J} (\sin \Psi + 4\alpha \cos \phi) \right\} \\ + \frac{t}{\omega} \left\{ (\sin \Psi + 4\alpha \cos \phi) \right. \\ \left. - \frac{1}{2\omega} \frac{K_a}{J} (-\cos \Psi + 8\alpha \sin \phi) \right\} - A = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

다시 $\frac{1}{2\omega} \frac{K_a}{J}$ 의 계수를 포함하는 항은 다른 항보다 대단히 적다고 볼 수 있으므로

$$t^2 (\cos \varphi - B) + \frac{t}{\omega} (\sin \Psi + 4\alpha \cos \phi) - A = 0 \quad (7)$$

으로 된다. 식 (5), (6), (7)은 정수 A 에 포함되어 있는 可動部의 回轉角 ϕ_{cf} 와 동작시간 t 의 관계를 나타내는 기본식이 된다.

이 근사식의 적용범위는 주어진 電流方向繼電器에 관하여 3절에서와 같은 정수를 대입하면 식 (5)는 $\varphi \geq 60^\circ$ 일 때, 식 (6)은 $60^\circ > \varphi \geq 30^\circ$ 또는 $\alpha \sin \phi = 0$ 일 때, 식 (7)은 $30^\circ > \varphi$ 일 때 적용될 수 있음을 알 수 있다.

3. 試驗繼電器의 특성

3-1 運動方程式의 정수 결정

식 (2)를 J 로 나누면 식 (8)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} & \frac{d^2\phi_c}{dt^2} + \frac{K_a}{J} \frac{d\phi_c}{dt} + \frac{K_b}{J} \phi_c + \frac{K_c}{J} \\ & = \frac{K}{J} P \{ \cos \varphi - \cos(2\omega t + \Psi) \} \\ & + 2a \sin(\omega t + \phi) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $P = \frac{1}{2} E_m I_m$ 이며 계수는 다음과 같이 구하여진다. 우선 계수 K/J 는 식 (8)에서 $t \gg \frac{1}{\omega}$, $\alpha = 0$, $\Psi = 0$ 인 조건을 적용하면 구할 수 있으며 이 때는 스프링에 의하여 可動部에 주어지는 토크 τ_{ro} 가 0이므로 B도 0으로 놓으면

$$\begin{aligned} t^2 \cos \varphi - 2\phi_{cf} / \left(\frac{K}{J} \frac{E_m I_m}{2} \right) & = 0 \\ \frac{K}{J} & = \frac{2\phi_{cf}}{P} - \frac{1}{t^2 \cos \varphi} \end{aligned}$$

다음에 계수 K_c/J 는 可動部가 정지상태인 경우 제어 스프링에 의하여 可動部에 주는 토크 τ_{ro} 만 있으며 $\phi_c = 0$ 가 되므로 식 (8)에서 A가 0이 된다. 이때의 P를 P_0 라하면

$$\begin{aligned} \cos \varphi - \left(\frac{K_c}{J} \right) / \left(\frac{K}{J} \frac{E_m I_m}{2} \right) & = 0 \\ \frac{K_c}{J} & = \frac{K}{J} P_0 \cos \varphi \end{aligned}$$

다음은 可動部가 동작하여 최종각인 $\phi_c = \phi_{cf}$ 까지 회전하였을 경우 제어 토크 τ_r 만이 작용한다고 하면, 이때의 P를 P_r 라 하고

$$\frac{K_b}{J} = \left[\left(\frac{K}{J} \right) P_r \cos \varphi - \left(\frac{K_c}{J} \right) \right] \frac{1}{\phi_{cf}}$$

로 된다.

다시 위의 경우 $t \gg \frac{1}{\omega}$, $\alpha = 0$ 일 때 驅動 토크만이 작용한다고 하면 식 (6)에서

$$\begin{aligned} t^2 \left[\cos \varphi - \left(\frac{K_c}{J} \right) / \frac{K}{J} \frac{E_m I_m}{2} \right] - \frac{1}{2\omega} \\ \frac{K_a}{J} \sin \Psi \Big] + \frac{t}{\omega} \sin \Psi - \frac{2\phi_{cf}}{K \frac{E_m I_m}{2}} & = 0 \end{aligned}$$

가 되며 계수 K_a/J 를 구하면

$$\begin{aligned} \frac{K_a}{J} & = \frac{2\omega}{t^2 \sin \Psi} \left\{ t^2 \cos \varphi + \frac{t}{\omega} \sin \Psi \right. \\ & \left. - \frac{2\phi_{cf} + (K_a/J)t^2}{(K/J)P} \right\} \end{aligned}$$

로 구할 수가 있다.

電流方向繼電器(試驗繼電器)의 정수치는

$$\begin{aligned} \phi_{cf} & = 4.7 \times 10^{-2} \text{ (rad)}, K/J = 0.43, K_c/J = 3.5, \\ K_b/J & = 13, K_a/J = 40 \quad (\phi_c = 2.25^\circ \text{ 늦음}) \end{aligned}$$

이 값들은 直流分을 포함하지 않을 때 限時特性과 최소 動作電流의 측정에서 결정할 수 있다.

3-2 測定値와 計算値

회로의 전위에 직렬로 蓄電池를 접속하고 고장 電流인 直流分은 비간헐적인 電流를 중첩하여 흘리면서 오실로그래프로 기록시켜 구한 값이 測定値이며 식 (5), (6), (7)에 (3-1)에서 구한 정수의 값을 대입하여 쓴 것이 計算値이다.

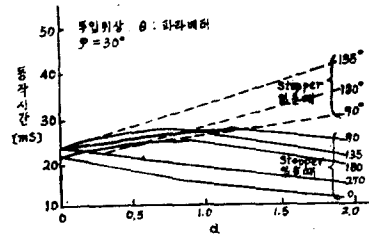


그림 2. α -동작시간 특성(투입위상파라미터)
Fig 2. Characteristic of operational time(phase parameter)

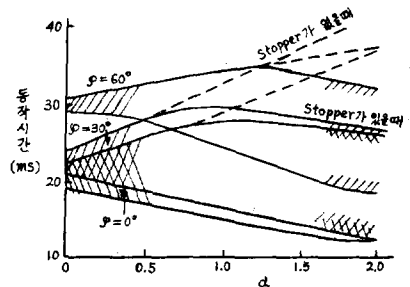


그림 3. α -동작시간특성(φ 를 파라미터)
Fig 3. Characteristic of operational time(φ parameter)

그림 2는 直流分과 交流分의 비 α 와 電流方向繼電器의 동작시간과의 관계를 표시하였으며, 동작시간의 상한점은 스토퍼가 있으면 단축되고 상하한 점은 모두 直流分이 크게 될수록 짧게 됨을 알 수 있다. 그림 3은 그림 2의 φ 를 파라미터로 하여 계산한 直流分과 동작시간의 관계를 표시하는 것이다.

4. 檢計 및 考察

4-1 直流分의 영향

그림 3과 같이 直流分 α 가 증가함에 따라 電壓, 電

流의 位相差角 ϕ_0 의 값에 관계없이 動作時間의 投入位相 θ 에 의하 변동의 폭이 크게 되며 또 最短動作時間은 감소한다.

즉 α 가 크면 어떤 특정한 θ 에 있어서 最短動作時間은 더욱 짧아진다. 역시 動作, 不動作의 한계인 最少動作電流値는 α 와 θ 에 의하여 영향을 받지 않음이 실험적으로 규명되었다.

動作時間은 運動方程式을 고려하여 생각한 범위보다 길게 되며, 실제로 α 및 θ 에 의한 過渡狀態의 異常토 오르는 무시되고, 定常狀態의 토오르만 電流方向繼電器의 動作에 관계된다. 따라서 1 cycle이상의 動作時間을 갖는 電流方向繼電器만을 문제시 하면 最少動作電流는 直流分에 의한 영향을 받지 않으며 誤動作의 원인이 되지 않는다.

4-2 電壓 및 力率이 극히 낮은 경우

보통 系統의 고장중에는 電流가 격증하는 반면에 電壓, 力率은 현저하게 저하하므로 여기에 관하여 검토하면 표 1은 식 (5)에 電壓코일의 位相角 ϕ_0 을 고려한 계산치가 實測値와 아주 근사함을 알 수 있다.

따라서 그림 3과 같은 α 와 電流方向繼電器動作時間의 계산결과를 이용하여 $\alpha=0$ 때 電流코일의 電流가 같으면 動作時間은 그림 3보다 길게 되나 特性曲線은 같은 모양의 경향을 보이며, 電流方向繼電器 動作時間은 α 가 증가함에 따라 반 cycle정도 짧아진다.

5. 結 論

이상과 같이 본 論文에서는 電流計型 電流方向繼電器를 예로하여 直流分에 의한 動作特性의 영향을 運動學的으로 해석하였다.

(1) 運動方程式에 의한 理論式과 실측한 값과는 잘 일치하며 運動方程式의 계수는 電流方向繼電器의 $I-t$

표 1. α 에 대한 동작시간
Table. 1 Performance Time V_s, α
($\phi=80^\circ, E=100V, I=5A$)

α	t (ms)(계산치)	t (ms)(측정치)
0	41.1	40.3
0.09	37.9	37.2
0.11	41.5	41.0
0.27	38.5	37.6
0.40	37.8	37.0
0.51	33.8	34.28
0.65	32.5	31.8
0.74	29.0	28.3
1.10	43.0	44.5
1.46	25.2	24.9

特性에서 간단히 결정할 수 있다.

(2) 直流分에 의한 電流方向繼電器의 동작시간에 미치는 영향은 스토퍼가 있을 경우, $\alpha=100$ (%)에서 다소 지연되나 이 이상의 直流分에 대해서는 $\alpha=0$ 일 때보다 약 0.5(cycle)정도 짧아지며, 스토퍼가 없는 경우는 때에 따라서 0.75(cycle)정도 지연된다.

(3) 電流計型 電流方向繼電器의 過渡特性은 본문에서와 같이 非直線性으로 되나 이러 特性을 문제시하지 않을 때는 아나로그계산기에 의하여 정확히 해석할 수 있으며 設計에 충분히 이용할 수 있겠다.

參 考 文 獻

(1) 日本電氣學會『通信教育會 “電氣計測器” 日本電氣學會, 昭和 42, p. 129
(2) 李柱根 “電氣計測” 東明社 1970, p. 79
(3) Melville B. Stout “Basic Electrical Measurements” 1970. p. 116