

Digital Relaying의 기술동향

申明澈
(成均館大 工大 副教授)

■ 차 례 ■

- 1. 서론
- 2. Digital 계전기의 구조
- 3. 전력계통의 Digital Relaying 알고리즘
 - 3.1 계통정수에 기초를 둔 알고리즘
 - 3.2 기본주파신호에 기초를 둔 알고리즘
 - 3.3 과도주파신호에 기초를 둔 알고리즘
- 4. 결론
참고문헌

1 서론

전력계통의 보호계전기는 1901년 electromechanical type의 과전류 계전기가 사용되기 시작된 이후 전력계통의 대형화에 따른 계전기의 고속화 및 고성능화의 필요성을 충족시키기 위하여 꾸준히 발전되어 왔다. 성능면에서 우수한 트랜지스터형 계전기의 활용은 물론, 1969년에는 소형 컴퓨터를 이용한 전력계통의 보호계전기법이 발표되었고 1974년부터는 마이크로 프로세서의 등장으로 종래의 Analog 계전기의 단점을 보강하고 계전기의 고성능화, 고신뢰도는 물론 장치의 축소화와 경제성 면에서도 향상된 digital 계전기의 발달이 더욱 활발하게 되었다.

여기서는 이와 같은 추세로 발달되고 있는 digital 계전기의 구조 및 특성을 간략히 기술하고 전력계통 보호를 위한 알고리즘의 연구동향에 대하여 살펴보기로 한다.

2 Digital 계전기의 구조

종래의 analog 계전기의 단점을 보강하고 실제의 전력계통 보호에 요구되는 고신뢰성 및 고성능을 기할 수 있는 digital 계전기의 개략적인 구조는 그림 1과 같다.

그림 1의 각 구성요소의 기능을 살펴보면, analog

input system은 CT(Current Transformer)나 PT(Potential Transformer)와 같은 transducer로부터 3상 교류신호를 받아들이고, 이 모든 analog 량을 동시에 사이클당 4~32회의 균일한 시간격으로 표준화 되어 digital 형태로 A/D변환기에 의하여 변환된다. 이때 analog량을 검출하는 sensor는 전력계통과 신호계통 사이의 절연상태를 유지해야 하며 샘플링시 발생될 수 있는 aliasing error를 줄이기 위하여 샘플링 주파수의 1/2 이상의 주파수 성분을 제거할 수 있는 analog low-pass filter를 sensor 바로 뒤에 둔다. 또한 비정상 상태의 전류나 전압에 포함될 수 있는 불필요한 직류분이나 고조파 성분을 제거하기 위하여 digital filter를 A/D 변환기 다음에 둔다. 또한 샘플링 주기의 선정에서도 12배의 샘플링 주파수를 채용하고 있고, 서로 다른 위치로부터 전송되는 순간적인 데이터를 동일시각에

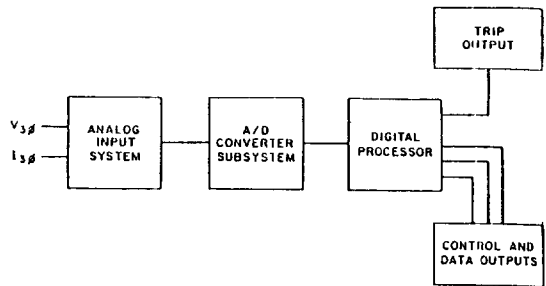


그림 1. Digital 계전기의 개략도

샘플링하기 위한 기법도 적용되고 있다.

이와 같은 과정으로 변환된 digital 데이터가 digital processor에 전달되면 필요한 algorithm에 따라 연산 처리된 후 그 결과가 기억 정정되거나 출력을 발생시킨다. 즉 전력계통의 고장이 발생되었을 때 차단기의 trip 명령을 trip output에서 보내어 계통의 각 보호기기가 정상적으로 되어 계통의 안전운전을 도모하게 된다.

③ 전력계통의 Digital Relaying 알고리즘

전력계통을 보호할 목적으로 사용되는 digital relaying 알고리즘은 전송선로, 변압기, 모선 및 발전기 등과 같이 적용대상에 따라 여러가지로 분류되어 발전되어 왔으나, 여기서는 전력계통의 선로보호에 적용되는 알고리즘에 한하여 살펴보기로 한다. 전력계통의 보호를 위한 알고리즘은 relaying decision에 사용되는 최종 입력신호에 따라 다음과 같이 3 종류로 나누어 설명될 수 있다.

3.1 계통정수에 기초를 둔 알고리즘

전력계통의 선로정수 R과 L을 이용하여 표현한 간단한 형태의 선로 모델식은 다음과 같다.

$$v = Ri + Ldi/dt$$

식 (1)을 이용하여 계산된 R과 L은 phase-distance와 ground-distance relaying 기법에 활용될 수 있는데 고장의 형태에 따라 식 (1)의 해법은 다양하고 복잡하다.

1971년에 식 (1)의 수치적인 해법이 시도되었는데 그것은 2개의 연속적인 시간간격에 따라 적분을 취하여 해를 얻었다.¹⁾ 이때 사다리꼴 적분공식을 이용하여 얻어진 최종 결과식은 다음과 같다.

$$R = \frac{(v_{k-1} + v_k)(i_{k-1} - i_{k-2}) - (v_{k-1} + v_{k-2})(i_k - i_{k-1})}{[(i_{k-1} + i_k)(i_{k-1} - i_{k-2}) - (i_{k-1} + i_{k-2})(i_k - i_{k-1})]} \tag{2}$$

$$L = \frac{h}{2} \frac{(v_{k-1} + v_{k-2})(i_{k-1} + i_k) - (v_{k-1} + v_k)(i_{k-1} + i_{k-2})}{[(i_{k-1} + i_k)(i_{k-1} - i_{k-2}) - (i_{k-1} + i_{k-2})(i_k - i_{k-1})]} \tag{3}$$

그후 식 (1)의 해법으로 미분에 의한 difference approximation을 취한 것이 제안되었으나²⁾ 위에서 언급된 수치적분법과 매우 유사함이 밝혀졌다. 또 R과 L의 연산에 여러개의 샘플을 이용하는 알고리즘도 발표되었으나 식 (1)에 고려되지 않은 실제의 계통특성을 만족시키지 못하는 문제점이 있었다. 즉

식 (1)은 완전히 연가(transposed)된 선로로 취급하였으며 shunt capacitance와 직렬보상용 capacitance의 영향을 무시하였다. 따라서 불완전 연가에 의한 영향이나 2회선 선로의 내부 상호결합에 의한 영향이 고려되어야 하며 고장시의 고장저항 및 그에 의한 조류의 영향이 고려되어야 할 것으로 지적된다. 이와 같은 문제의 해결법으로 많은 기법이 제안되었는데 그중 많은 곳에 활용되고 있는 것으로 low-pass anti-aliasing filter를 이용하는 방법이 있다. 여기에도 고조파 과도성분에 의한 문제점이 있어 식 (1)의 오차항과 계산된 R과 L의 값의 평균 자승 오차가 최소로 되도록 하여 오차의 영향을 제거할 수 있는 방법이 활용되고 있다.⁴⁾

또 위의 문제를 해결하기 위하여 식 (1)을 변형하여 실제의 계통특성이 고려된 결과가 얻어지도록 시도되었다. 즉 전력계통을 single PI section으로 표현하고 추가되는 filtering 과정 없이 입력신호의 DC transient offset과 과도 고주파 성분을 조정할 수 있도록 한 것이다. 이때 연산처리과정이 다소 복잡하나 저역 filter 과정을 갖는 알고리즘과 비교할 때 전체의 연산시간은 별차이가 없는 것으로 알려졌다. 또 기본 모델에 series-compensation capacitance를 추가한 방법도 제시되었는데 이 경우에는 3개의 적분구간에 대하여 적분을 취함으로 필요한 식을 추출할 수 있다. 이 방법은 선로의 상호 결합 특성, 불완전한 연가에 의한 영향 및 고장저항에 의한 영향도 쉽게 고려될 수 있다.

이상에서 논한 바와 같이 digital relaying을 위한 완전한 알고리즘은 없다고 할 수 있다. 따라서 위의 각종 알고리즘을 기초로 하여 정확도를 향상시키거나 연산효율을 높이기 위한 방향으로 연구되고 있다.

3.2 기본주파신호에 기초를 둔 알고리즘

이 방법은 orthogonal transfer 이론에 기초를 두고 orthogonal set로는 sine 및 cosine 함수를 적용하여 Fourier 변환이론을 이용한 것으로 임의의 함수를 정의된 orthogonal set의 조합으로 표현하고 Fourier transform의 기본 성질인 convolution과 correlation을 이용하여 입력신호에서 특정한 주파수 성분을 추출하도록 하였다. 이때 얻어지는 표현식은 연속적(contineous)이거나 이산적(discrete)인 Fourier transform의 형태로 되나 모두 digital solution을 얻도록 변환이 가능하다.

초기에는 기본 sine과 cosine 파형의 샘플을 이용하여 입력신호의 샘플을 정하였다.⁵⁾ 즉 입력파형이

직각좌표형태로 주어지면 그 때의 sample point k 에서 전압의 sine과 cosine 성분으로 표현된 일반식은 다음과 같다.

$$V_s = 1/N [2 \sum_{i=1}^{N-1} V_{k-N+i} \sin(2\pi \ell / N)] \quad (4)$$

$$V_c = 1/N [V_{k-N} + V_k + 2 \sum_{i=1}^{N-1} V_{k-N+i} \cos(2\pi \ell / N)] \quad (5)$$

여기서 V_s 는 전압의 sample을, N 은 기본 사이클당 취한 sample의 수를 나타낸다. 식 (4)와 (5)를 극좌표 형태로 변환하면 전압 V 는 다음과 같이 표현된다.

$$V = (V_s^2 + V_c^2)^{1/2} \quad (6)$$

이때 전압의 위상각 ϕ_v 는

$$\phi_v = \tan^{-1}(V_s/V_c) \quad (7)$$

와 같고, 식 (6)과 (7)을 이용한 극좌표 형태의 임피던스는 식 (8)과 같다.

$$|Z| = [(V_s^2 + V_c^2)/(I_s^2 + I_c^2)]^{1/2} \quad (8)$$

또 임피던스의 위상각 ϕ_z 는 다음과 같다.

$$\phi_z = \tan^{-1}(V/I) \quad (9)$$

위의 식 (8)과 (9)는 relaying 동작에 사용될 수 있으며, 이 때의 비교 결정방법에 따라 distance impedance relaying 기능의 실현이 가능하게 된다.

이상의 방법은 기본과 성분만을 고려하였고 고장시에 임피던스를 나타내는 식의 표현이 결여되어 대부분의 연산에 정확도가 부족함을 지적할 수 있다. 이와 같은 결점을 보완하기 위한 방법으로 반사이클에 대한 data window를 감소하기 위하여 식 (4)와 (5)에 제한(limit)을 주는 방법이 제안되었나⁶ DC offset과 고조파 성분에 의한 오차는 피할 수 없었다. 그러나 오차의 요인을 제거하는 여러가지 보상법에 의하여 실용에는 크게 문제되지 않는다.

반사이클을 이용한 이 방법(1/2 cycle scheme)은 Fourier 계수들의 대칭성을 이용하여 매 사이클당 12개의 sample을 사용하면 계산상 유효한 결과를 얻을 수 있다. 또 대칭좌표법을 relaying decision에 사용하면 Fourier 해석은 더욱 용이하게 할 수 있다. 따라서 식 (4)와 (5)의 기본 주파성분을 계산하기 위한 Fourier 급수 근사해가 발표되었고^{7,8} correlation technique를 이용한 Noth filter 방법도 연구되었다.⁹

그후 Orthogonal set로 sine과 cosine 함수 대신에 구형파(odd and even square wave)를 이용하면 곱

셈 과정에서 상호 상쇄가 가능하여 연산상 유리하므로 Walsh 함수를 이용한 알고리즘도 제안되었다.¹⁰ 또 고장상태의 신호에서도 기본주파 신호를 추출할 수 있도록 하기 위하여 Orthogonal set를 도함수로 사용하는 근사해법도 발표되었다.^{11,12} 그러나 여기에서도 각 수식의 digital화라는 어려움이 지적되고 있다.

최근에는 입력신호로 고장상태의 저항과 리액턴스를 직접 계산할 수 있도록 하는 Sinusoidal curve fitting 방법이 대두되어 Relaying 기능에 필요한 조류와 같은 전기량의 전압, 전류의 최대치를 보다 정확하게 계산할 수 있도록 기여하고 있다.

3.3 과도주파신호에 기초를 둔 알고리즘

여기서는 기본주파성분에 고조파성분을 추가하여 입력신호를 모델화하고 최소자승 추정법에 의하여 미지 파라미터를 결정하는 방법과 전력계통으로부터 직접 얻어지는 파형 즉 분포정수 방정식의 해에 의하여 얻어지는 진행파를 이용하는 방법에 관하여 살펴본다.

최소자승추정법은 파형을 감쇄하는 DC offset 항과 고조파성분의 항을 포함시켜 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y = K_1 e^{-\lambda t} + \sum_{m=1}^N [K_{2m} \sin(m\omega t) + K_{2m+1} \cos(m\omega t)] \quad (10)$$

여기서 K_1 는 미지의 파라미터, N 은 고려하고자 하는 고조파의 수, λ 는 offset성분의 감쇄정수이고, ω 는 각 주파수를 나타낸다. 이 때 식(11)이 최소로 될 때의 파라미터를 추정하게 된다.

$$E = \int_0^T \left\{ I - K_1 e^{-\lambda t} - \sum_{m=1}^N [K_{2m} \sin(m\omega t) + K_{2m+1} \cos(m\omega t)] \right\}^2 \quad (11)$$

여기서 I 는 분석하고자 하는 파형이고 T 는 샘플 주기를 나타낸다. 그 해법으로는 고조파 성분과 DC offset을 고려하여 근사값에 접근하는 기법과 지수항과 정현파항을 Taylor급수로 전개하여 확장시켜 해를 구하는 방법이 제안되었다.¹³ 이 방법들은 연산과정이 복잡하고, 사이클당 샘플 수와 data window의 선정에 따라 정확도가 달라진다.

진행파를 활용하는 방법은 다음과 같은 분포정수 전송 방정식을 이용한다.

$$-\partial v / \partial x = L di / dt \quad (12)$$

$$-\partial i / \partial x = C dv / dt \quad (13)$$

그러면 식 (12)와 (13)으로 부터

$$v(x, t) = \phi^+(x-at) - z\phi^-(x+at) \tag{14}$$

$$i(x, t) = \phi^+(x-at) + \phi^-(x+at) \tag{15}$$

를 얻을 수 있다. 이때 L과 C는 각각 단위 길이당 직렬 인덕턴스와 분포 capacitance를 나타내고, Z는 파동 임피던스, a는 전파속도를 의미한다. 또한 ϕ^+ 와 ϕ^- 는 각각 양과 음의 방향으로 이동하는 진행파이다. 이와 같은 진행파방식은 근본적으로 고조파 과도성분을 이용하므로 relaying을 위한 과도성분의 filtering과정이 필요치 않게 된다. 따라서 Filtering delay를 없앨 수 있을 뿐 아니라 연산속도면에서도 우수하게 평가되고 있다. 그러나 샘플 주파수가 증가하므로 연산을 위한 시간이 짧다는 단점이 있다.

또한 고장시에 전압이나 전류의 순간적인 변동상을 검출하여 relay 단자로 부터 상대적인 고장의 위치를 탐색할 수 있는 기법과 정상상태의 선로 양단에서 전압과 전류의 신호가 일정하다는 특성을 이용한 알고리즘도 제시되었다. 그러나 이와 같은 기법들은 초기의 각종 오차에 매우 민감하다. 따라서 선로의 상호 결합상태, 파동 임피던스의 오차, 저항손실, 파라미터에 따라 변하는 주파수 및 통신 장치에 의한 지연현상에 의한 영향이 잘 고려되어야 한다.

최근들어 한쪽 단자의 입사파와 반사파의 특성을 이용하는 기법이 연구되고 있다.¹⁴⁾ 이것은 고장시 입사파와 반사파가 부호만 반대일 뿐 그 크기가 같고, 또 고장저항에 관련된 constant scaling factor도 같으며 이 때의 시간지연이 relaying 점에서 고장점까지 전파속도의 2배로 된다는 사실을 이용하여 고장점의 위치를 추정하는 기법이다. 이와 같은 correlation method는 가장 적절이 응용될 수 있는 것으로 받아들여지고 더욱 정확한 해를 위한 수정법이 연구되고 있다.

4 결론

이상에서 digital 계전기의 개략적인 구조와 계통 보호용 알고리즘을 중심으로 개발동향과 문제점을 살펴보았다. 급진적인 전자기술의 발달에 따라 digital 계전기는 하드웨어의 풍부한 연산능력과 광범위한 정보의 수집으로 다기능적이고 종합판단 처리를 할 수 있는 방향으로 개선되어 가고, 여기에 우수한 알고리즘의 적용으로 합리적인 계통운용을 도모하도록 연구되어 가고 있다고 하겠다.

앞서 언급된 계통정수에 기초를 둔 알고리즘은 그 정확도를 향상시키기 위하여 많은 기법이 제시되고 있으며, 기본주파신호에 기초를 둔 알고리즘은 최적의 직교함수를 적용함으로써 그 정확도를 향상시키고 있다. 또한 진행파를 활용하는 기법에서는 비교적 높은 정확도와 신속성을 유지하여 우수한 알고리즘으로 받아들여지고 있으나 relaying decision에 결정적인 영향을 주는 data의 샘플링과 pre-filtering 과정에 더많은 연구가 요청되고 있다.

보다 효율적인 연산 알고리즘과 하드웨어의 발달로 새로운 기능이 개발되고 적용범위의 확대, 고신뢰성 및 고성능화를 이룩할 수 있을 것이며 복합된 장치사이에 데이터의 공용화와 합리적인 하드웨어의 활용방안이 제시될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 1) A. D. McInnes and I. F. Morrison, Real time calculation of resistance and reactance for transmission line protection by digital computer, Trans, Inst, Eng., Aust., EE 7, 1971, pp.16-23.
- 2) W. J. Smolinski, An algorithm for digital impedance calculation using a single PI section transmission line model, IEEE Trans, PAS-98, 1977, pp. 1546-1551
- 3) T. Lobos and H. J. Koglin, Investigation of fast algorithms for digital line protection, Proceedings of the 6th power system computation, 1979, pp. 620-628
- 4) A. M. Ranjbar and B. J. Cory, An improved method for the digital protection of high voltage transmission lines, IEEE Trans., PAS-94, 1975, pp. 544-550
- 5) J. G. Gilbert et al., The development and selection of algorithms for relaying of transmission lines by digital computers, power system control and protection, Academic press, New york, 1978
- 6) A. G. Phadke, T. Hlibka and M. Ibrahim, A digital computer system for EHV substation analysis and field tests, IEEE Trans., PAS-95, 1976, pp. 291-301
- 7) P. G. McLaren and M. A. Redfern, Fourier series techniques applied to distance protection, Proc. Inst., Electr Eng., 122, 1975, pp. 1301-1305
- 8) G. S. Hope, O. P. Malik and M. E. Masmcy,

- Digital transmission line protection in real time, Proc. Inst., Electr. Eng., 123, 1976, pp.1349-1353
- 9) J. Carr and R.V. Jackson, Frequency domain analysis applied to digital transmission line protection, IEEE Trans., PAS-94, 1975, pp.1157-1166
 - 10) J.W. Horton, Walsh function for digital impedance relaying for power lines, IBM.J.Res. 10, 1976, pp, 53-54
 - 11) B. J. Mann and I. F. Morrison, Digital Calculation of Impedance for transmission line protection, IEEE Trans., PAS-90, 1971, pp.270-279
 - 12) G. B. Gilcrest, G.D. Rockefeller and E.A. Udren, High speed distance relaying using a digital computer, part I-system description, IEEE Trans., PAS-91, 1972, pp. 1235-1243
 - 13) M. S. Sachdev and M. A. Baribeau, A new algorithms for digital impedance relays, IEEE Trans, PAS-98, 1979, pp. 2232-2240
 - 14) M. Vitins, A. correlation method for transmission line protection, IEEE Trans., PAS-97, 1978, pp. 1607-1618
 - 15) A. A. Girgis, R.G. Brown, Application of Kalman filtering in computer relaying, IEEE Trans., PAS-100 1981, pp. 3387-3397