

계통변화를 고려한 자율 적응형 과전류 계전기

윤준석* 이승재 최면송 강상희 김상태 임성일 오성민 김지근 박성준
 명지대학교 차세대 전력기술연구센터

Autonomous Adaptive Digital Over Current Relay

J.S. Yun S.J. Lee M.S. Choi S.H. Kang S.T. Kim S.I. Lim S.M. Oh J.K. Kim S.J. Park
 Myongji University Next-Generation Power Technology Center

Abstract - In this paper present Autonomous Adaptive Digital Over Current Relay which acts autonomous setting using voltage and current measured by relay in the change of power systems. Automation of relay setting is required for distribution automation, although manual relay setting is used at present. This paper presents Autonomous Relay Setting which knows change of the power system and acquires setting element using the Recursive Least Squares. Relay setting is very difficult work. But proposed relay is expected to decrease burden of relay setting using acquired information of power system change and autonomous setting. Also fast protective ability is expected according to change of power system.

전방식 중에서도 가장 기본적인 방식이고 간단하며, 경제적인 이점을 가지고 있다. 현재 주보호로서는 비교적 저압의 방사성 송배전선이나 전기소의 소내회로의 보호에 한하며 일반적으로는 후비보호로서 사용되고 있다. 기본원리는 송배전선에 사고발생시 상시 부하전류보다 큰 사고전류가 흐르는 것을 검출해서 동작하는 것이다. 아래의 그림은 일반적인 과전류 계전기 보호방식을 보여 주고 있다.(3)

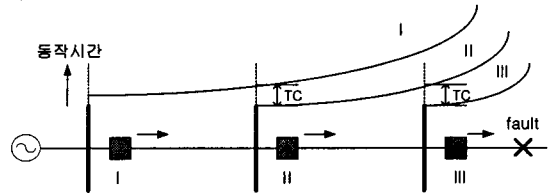


그림 1. 과전류 계전기의 보호

이와 같이 과전류 계전기에 의한 보호는 자기단 고장에 대해서는 최대한 빨리 동작하고 후비보호를 위하여 협조 시간(TC)을 두어 그 동작 시간에 따라서 사고 범위의 선택차단을 행하는 반한시 특성이 일반적이다.

2.2 과전류 계전기의 일반적인 정정

과전류 계전방식은 통상 자구간의 주보호와 동시에 인접 구간에 후비 보호를 겸하는 까닭으로 인접 구간의 계전기와와의 협조에 대해서 충분히 고려하지 않으면 안된다.정정은 두가지로 나누어 생각할수 있다.(3)

(1) 동작치의 정정

동작 전류치는 자구간의 사고는 물론 인접구간의 후비 보호까지도 완전하게 행할수 있도록 하여야 한다. 픽업 전류는 텡(Tap)으로 결정되는데 오동작을 피하고 감도를 높이기 위해선 최대 부하전류보다는 커야 하고 최소 고장전류보다는 작아야 한다. 보통 최대부하의 125~150%로 정하며 최소고장전류는 OCR의 종류에 따라 2선 단락이나 1선지락 사고를 상정한다.(3)

(2) 동작시간의 정정

텡정정이 끝나면 인접구간의 OCR간에 선택성을 갖기 위해 Time dial(또는 Time lever)로 동작시간을 결정한다. 자구간 고장에서는 최대한 빨리 동작해야 하고 인접구간에 대해선 협조시간을 가진다. 협조시간은 보통 0.4~0.5S 로 본다.(5)

2.3 제안된 계전기의 정정

본 논문에서 제안하는 자율 적응형 과전류 계전기는 일반적인 정정 개념에 따라 자구간에서 구할 수 있는 모든 데이터로 정정을 취한다. 우선 픽업전류는 최대부하전류와 최소고장전류를 알아야 하나 여기서는 계전기 측정전

1. 서 론

현재 사회전반에 걸쳐 전기에너지에 대한 의존도가 높아지고 정보화사회가 고도화됨에 따라 전력의 안정적 공급과 질적 향상에 대한 요구는 급증하고 있다. 또한 전력계통에는 수많은 발·변전 및 송배전 설비가 서로 복잡하게 연계되어 있기 때문에 고장 발생시 신속하게 고장구간을 계통으로부터 분리시키지 않으면 전력설비는 크게 손상될 뿐만 아니라 고장이 인접구간으로 파급되어 사고의 범위는 확대되어 간다(6). 따라서 계통 보호가 필요하고 보호계전기의 중요성은 더욱 증대되고 있다.

본 논문에서는 보호 계전기 중에서 가장 기초적이면서도 배전반 등에 일반적으로 사용되는 과전류 계전기에 자율적응성을 부여한 새로운 타입의 자율적응형 과전류 계전기를 제안한다. 전력계통은 고장발생으로 인한 구간 절제 및 복구, 기기나 설비의 점검 등으로 인해 종종 변경되어 질 수 있다. 이때 변화된 계통에 맞게 보호계전기의 정정값을 바꾸어 줄 필요가 있는데 현재는 정정전문가에 의해서 수작업으로 이루어지고 있다. 하지만 정정업무는 상당히 어려운 작업중의 하나이고 빈번한 계통 변화에 실시간으로 대응하기란 사실상 불가능하다. 또한 현재의 픽업전류는 가능한 높게 취하고 있어서 고감도의 고장검출이 어렵다. 본 논문에서는 계통의 변화에 따른 단락임피던스의 변화를 반복 최소 자승법(Recursive Least Squares : RLS)을(2) 통하여 실시간으로 구하고 고장계산을 통하여 정정에 필요한 요소를 구함으로써 계전기 스스로 자율적으로 정정할 수 있음을 보이고 이를 제안한다.

2. 본 론

2.1 과전류 계전기(OCR)의 기본 보호방식

과전류 계전기에 의한 보호방식은 송배전선의 보호 계

류의 일정 샘플링값의 평균을 구하여 200%로 정하였다. 최대고장전류를 구하기 위해선 단락임피던스를 알아야 하는데 수시로 변하는 계통에서 단락임피던스를 구하기 위해선 적절한 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 RLS알고리즘을 사용하여 단락임피던스를 구하고 고장계산을 통하여 자기단 최대고장전류, 다음단 최대고장전류를 구한다. 그리고 강반한시 특성을 위하여 특정한 한점을 일정 비율로 정하여 선택하면 총 4개의 점을 얻을 수 있다. 동작시간에 있어서는 자기단 최대고장전류에 대하여 0.5S, 다음단 최대고장전류에 대해서는 협조시간(TC)0.5S로 정하였다. 픽업전류에서는 일반적으로 무한대의 시간을 가지나 여기서는 자기단 최대고장전류에 대한 동작시간의100배로 정하였다. 그림2는 제안한 계전기의 정정곡선의 나타내고 있다.

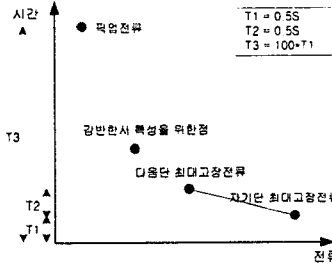


그림2. 제안된 OCB의 정정곡선

2.4 RLS(Recursive Least Squares) 알고리즘

본 논문에서 단락임피던스를 구하기 위해 사용되는 RLS 알고리즘을 간단히 설명한다.

2.4.1 최소 자승법(Least Squares)

일반적인 최소자승법의 문제에서 \hat{y} 는 "the computed variable"로서 가정되며 가우스 용어에서 아래의 모델로 주어진다.[2]

$$\hat{y} = \theta_1 \varphi_1(x) + \theta_2 \varphi_2(x) + \dots + \theta_n \varphi_n(x) \quad (1)$$

여기서, φ_n : known value

θ_n : unknown parameter

실제 관측된 값과 계산된 값들의 차를 제공하여 더한 값은 최소가 된다. 해석적인 값을 얻기 위해서는 계산된 값들은 추정 파라미터의 선형함수여야 한다.[1][2]

목적함수(loss function) $J(\theta)$ 는 다음과 같다.[2]

$$J(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 \quad (2)$$

$$\epsilon_i = y_i - \hat{y}_i = y_i - \theta_1 \varphi_1(x_i) - \dots - \theta_n \varphi_n(x_i) \quad (3)$$

계산을 쉽게 하기 위해 vector notations를 사용한다.

$$\varphi = [\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \dots \quad \varphi_n]^T$$

$$\theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \dots \quad \theta_n]^T$$

$$y = [y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_n]^T$$

$$\epsilon = [\epsilon_1 \quad \epsilon_2 \quad \dots \quad \epsilon_n]^T$$

$$\Phi = \begin{pmatrix} \varphi^T(x_1) \\ \vdots \\ \varphi^T(x_n) \end{pmatrix}$$

따라서 목적함수는 다음과 같이 쓰여 질 수 있다.[2]

$$J(\theta) = \frac{1}{2} \epsilon^T \epsilon = \frac{1}{2} \|\epsilon\|^2 \quad (4)$$

$$\epsilon = y - \hat{y}, \quad \hat{y} = \Phi \theta$$

파라미터 θ 를 최소화하기 위한 $J(\theta) = \frac{1}{2} \epsilon^T \epsilon$ 는 다음의 식들에서 보여진다.

$$\Phi^T \Phi \theta = \Phi^T y \quad (5)$$

$$\theta = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T y = \Phi^+ y \quad (6)$$

$$2J(\theta) = \epsilon^T \epsilon = (y - \Phi \theta)^T (y - \Phi \theta) \quad (7)$$

$$= y^T y - y^T \Phi \theta - \theta^T \Phi^T y + \theta^T \Phi^T \Phi \theta$$

$$\theta = \hat{\theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T y \quad (8)$$

2.4.2 RLS 알고리즘

같은 연산을 반복적으로 할 때 연산량을 줄일 필요가 있다. RLS알고리즘은 NON-RLS알고리즘보다 연산량을 상당히 줄일 수 있다.

만약 파라미터가 시변(time varying)이라면, 이전 데이터 영향의 제거가 필요하다. 이것은 지수함수를 가진 다음과 같은 목적함수를 사용한다.

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^N \lambda^{N-k} [y(k) - \varphi^T(k) \theta]^2 \quad (9)$$

여기서 λ 는 "forgetting factor"이며 1보다는 작다. 새로운 데이터가 들어올시 오래된 데이터의 영향을 제거한다. RLS알고리즘은 다음과 같이 표현된다.[2]

$$\hat{\theta}(N+1) = \hat{\theta}(N) + K(N)[y_{N+1} - \varphi^T(N+1) \hat{\theta}(N)] \quad (10)$$

$$K(N) = P(N+1) \varphi(N+1) \quad (11)$$

$$= P(N) \varphi(N+1) [\lambda + \varphi^T(N+1) P(N) \varphi(N+1)]^{-1}$$

$$P(N+1) = [I - K(N) \varphi^T(N+1)] P(N) / \lambda \quad (12)$$

위식에서 $P(N) = [P_0^{-1} + \Phi^T(N) \Phi(N)]^{-1}$ 이고 P_0 는 초기치로 매우 큰 값을 갖는 α (covariance initial value)에 의해서 $\alpha \cdot I$ 로 정해진다. 여기서 $\hat{\theta}(N) = P(N) [\Phi^T(N) y(N) + P(0)^{-1} \hat{\theta}(0)]$ 이고 벡터 θ 의 초기치는 알고있는 값이나 임의로 정할 수 있다.[1]

2.5 사례연구

본 사례연구에서는 전력계통이 수시로 변할 때 단락임피던스만 구할 수 있으면 고장계산을 통하여 계전기 정정요소를 구할 수 있고 계전기 스스로가 자율적으로 정정할 수 있다는 취지에 따라 먼저 RLS알고리즘을 통하여 단락임피던스를 구하고 고장계산을 한다. 단 여기서 구한 단락임피던스는 영상분을 고려하지 않은 정상분이며 실제 계통 파라미터는 복소수 형태로 표현되나 본 논문의 개념을 나타내기 위해 rms값을 사용하였다. 이는 다음 연구에서 이를 보정할 필요가 있다. 그리고 여기서는 현재 고감도로 정정이 되기 때문에 계통변경시 사고 오인으로 인한 오동작 가능성이 있는데 여기서는 고려하지 않았으며 추후 배전자동화시 어떤 신호를 받아 픽업치를 높여줄 필요가 있다. 또한 다른 보호기기들과의 협조를 고려하지 않았음을 미리 밝힌다.

먼저 계통을 선형적인 간단한 등가회로로 모델링하면 그림3과 같이 나타낼 수 있다. 그림3은 계전기 앞단을 하나의 등가회로로 구성하여 하나의 전압원과 임피던스로 나타내고 있다.

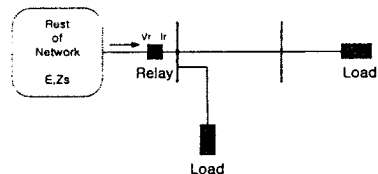


그림3. 계전기에서 바라본 간단한 전력계통

위에서 모델링한 회로는 아래의 식으로 등가된다.

$$V_r = E - Z_s I_r \quad (13)$$

식 (13)은 다시 아래의 매트릭스 형태로 표현된다.

$$\theta = [E \ Z_s]^T, \ X = [1 \ I_r], \ Y = [V_r] \quad (14)$$

이 수식을 시변형(Time-Varying) RLS알고리즘에 적용하여 파라미터 E 와 Z_s 를 추정한다. 우선 사례계통을 만들기 위해 먼저 파라미터 V_r, E, Z_s 에 계통변화에 따라 임의의 값을 주었으며 식 (13)에 따라 구해진 I_r 값으로 계통을 구성하였다. 그리고 V_r 과 I_r 값만으로 RLS 알고리즘을 이용하여 구하고자하는 파라미터 Z_s 를 추정하여 실제 값과 비교하였다. 알고리즘은 Matlab을[4] 사용하여 구현하였으며 2초 동안에 5번의 계통변화를 주었으며 계전기는 1사이클당 32샘플링하는 것으로 가정하여 총 3840샘플링데이터를 사용하였다.

기준용량	100(MVA)	초기 계통 등가전압	1(p.u)
기준전압	22.9(KV)	λ (forgetting factor)	0.98
기준전류	2521(A)	α (covariance initial value)	1000
계전기설치단 선로임피던스	0.8(p.u)	샘플링 주파수	1920(Hz)
초기 단락임피던스	0.4(p.u)	시뮬레이션 시간	2(sec)
사례 계통 구성 E (오차) = $\pm 1\%$			
파라미터 시간(sec)	E	V_r	Z_s
0-0.4	1.04	1 + E	0.420
0.4-0.8	1.03	0.99 + E	0.336
0.8-1.2	1.02	0.98 + E	0.252
1.2-1.6	1.025	0.985 + E	0.294
1.6-2	1.035	0.995 + E	0.378

표1. 시뮬레이션 데이터

위의 표는 시뮬레이션의 데이터를 보여주고 있다. 여기서 계전기 측정전압 V_r 은 난수를 발생하여 $\pm 1\%$ 이내의 측정오차를 포함시켰다.

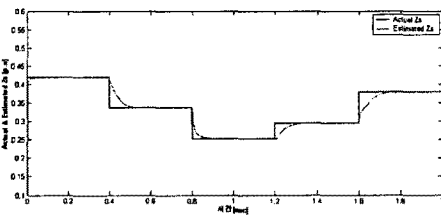


그림4. 계통변화에 따른 단락임피던스 추정

그림4는 RLS알고리즘을 통한 실제 단락임피던스와 추정된 단락임피던스를 보여주고 있는데 추정된 단락임피던스는 실제 단락임피던스와 10 사이클 이내에서 수렴하는 것을 보였다.

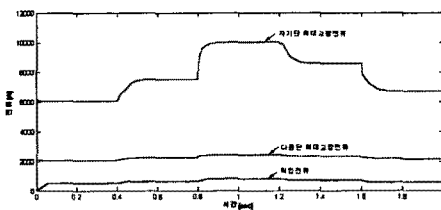


그림5. 계통변경에 따른 동작전류 추이

그림5는 계통 변경에 따른 추정된 단락임피던스로 고장계산을 통한 각 고장전류와 픽업전류의 추이를 보이고 있다. 여기서 픽업전류는 계전기 측정전류에서 평균값의 200%로 선정하였다.

표2는 계통변화에 따른 추정된 값 중 일정값으로 수렴 시의 정정에 필요한 데이터를 보여주고 있다.

정정요소 시간(sec)	단락임피던스 (p.u)	픽업전류 (A)	다음단 최대고장전류(A)	자기단 최대고장전류(A)
0-0.4	0.420	470.2	2066.4	6002.4
0.4-0.8	0.336	615.2	2219.2	7503.0
0.8-1.2	0.252	801.6	2396.4	10004.0
1.2-1.6	0.294	723.6	2304.4	8575.0
1.6-2	0.378	534.8	2140.1	6693.0
동작시간		50sec	1sec	0.5sec

표2. 계통변화에 따른 정정 데이터

결론

본 논문에서는 배전 자동화를 위하여 자율적응형 과전류 계전기를 제안 하였고 계전기의 측정 전압전류만으로 계통 변화에 따른 단락 임피던스의 변화를 추정하려 하였다.

사례연구에서는 제약조건은 많았으나 RLS 알고리즘을 사용하여 계통변화에 따른 단락임피던스를 구할 수 있었고 추정된 단락임피던스를 통해 최대고장전류와 정정에 필요한 요소를 구하였다. 결론적으로 계전기가 구한 데이터들은 계전기가 스스로 계통변화에 대하여 자율적으로 정정할 수 있음을 보여준다.

추후에 계전기간의 통신을 통한 주변 계통의 변화에 대한 정보와 각 보호기들의 정정 및 협조에 관한 데이터들이 더해진다면 더욱더 정확한 정정이 이루어지리라 확신하고 자동화된 배전 계통에서 본 논문에서 제안한 계전기는 충분히 활용성이 있다고 판단된다.

(감사의 글)

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

(참고 문헌)

- [1] 지준근, 차용석, "Design of Self-Tuning Speed Controller for DC Motor Drive System", 순천향산업 기술연구소논문집, 제5권 2호, pp.265-273, 1999
- [2] Karl J. Astron, Bjorn Wittenmark, "Computer Control of Dynamic Systems", Prentice-Hall, 1990, pp. 416-436
- [3] 中山敬浩, "保護繼電시스템", 世和, 1994, pp.47-57
- [4] 임종수, "MATLAB 완벽가이드", 가상과 현실, 1998
- [5] 신대승, "保護繼電시스템技術", 技多利, 2001, pp.172-175
- [6] 송길영, "송배전공학", 동일출판사, 1999, pp.397-424