

## A Protective Effectiveness Measure for Distribution Systems

玄升鎬\* · 李承宰\*\* · 林星日\* · 崔仁善\*\*\* · 申在恒\*\*\* · 崔勉松\*\*

(Seung. H. Hyun · Seung. J. Lee · Seong. I. Lim · In. S. Choi · Jae. H. Shin · Myeon. S. Choi)

**Abstract** - This paper suggests a novel evaluation scheme of protective effectiveness in distribution systems. The adequacy of every parameter in a protective device is evaluated for the setting or correction rules. Then, the protective effectiveness of a device, device-wise effectiveness, is obtained by the combination of the parametric evaluation results. The coordination-wise effectiveness between devices can be calculated by evaluating the parameters which contribute the performance of coordination. The protective effectiveness of the whole system can be obtained by combining the device-wise and coordination-wise effectiveness values.

The rules, in this paper, are categorized into three groups; rules for single parameter, rules for coordination between parameters, and rules for coordination between protective devices to form a hierarchical calculation model. The proposed method is applied to a typical distribution network to show its effectiveness.

**Keywords** : Distribution System Protection, Protective Effectiveness, Parameter of a Protective Device, Hierarchical B Calculation Model

### 1. 서 론

전력계통 보호 시스템의 목적은 사고 발생시 신속하게 그리고 정전구역을 최소화하면서 사고지점과 건전계통을 분리하는 것이다. 이를 위하여 계통의 성격에 따라 계전기 등의 각종 보호기와 차단설비가 장치되어 있다. 보호기는 특정 동작조건이 만족될 때에만 동작하도록 설정되며 동작조건을 정의하기 위하여 보호기마다 파라미터들을 가지고 있다. 예를 들어 과전류 계전기의 차단전류는 해당 계통의 최소 고장전류와 최대 부하전류 사이에 존재하도록 결정되는데, 이는 계통의 구성이나 부하 및 전원의 운용상태 뿐만 아니라 인접 보호기의 동작조건에 따른 협조 등이 복합적으로 고려되어야 한다.

보호기의 동작 조건은 전력계통 운영자의 정정 규칙에 따르는 것이 보통이다. 그러나 전력계통 운용 조건은 수시로 변경되는 것이 불가피한 반면, 일단 정해진 값을 계통의 운용조건이 변경될 때마다 변경하는 것은 현실적으로 매우 어려운 일이다. 따라서 현재 전력계통에 존재하는 보호 기기의 파라미터는 처음 설치할 당시의 운용 조건에 맞추어 설정되어 있으며, 그 이후에 발생한 변화는 반영되지 못하는 실정이다.

최근, 디지털 기술과 통신기술의 비약적인 발전으로 인해 전력계통 보호기에도 많은 변화가 있어왔으며, 외국의 선

진기업에서는 기존의 보호기에서는 기대할 수 없었던 많은 기능들을 갖춘 보호기들을 속속 개발, 출시하고 있다.

이와 같이, 각 보호기들이 일정 수준의 연산능력과 외부와의 통신수단을 구비한다면, 계통의 변화에 대하여 보호 시스템 스스로 최적의 보호수준을 유지할 수 있는 적응 보호능력을 갖게 할 수 있을 것이다. 이를 위해서는 현재의 전력계통 운영조건에 대하여 현재 보호시스템의 보호능력이 어느 정도인지를 판정할 수 있는 수단은 필수적이라 할 수 있다.

지금까지, 보호시스템의 보호능력을 평가하는 방법에 대한 연구가 발표된 바는 그리 많지 않다. 통계적인 방법에 의하여 파일럿 계전기나 디지털 계전기의 성능을 평가한 연구들이 있으나[1-3], 이들은 시스템 입장에서 보호능력 관점이 아니라, 개별 계전기의 단일기로서의 성능을 분석한 것이다. 보호성능에 대해서는 계전기의 알고리즘 분석과 평가에 대한 연구가 있다[4]. 이상의 연구들은 개별 보호기, 혹은 내부 알고리즘에 대한 평가에 대해서는 매우 유용하나, 시스템 차원의 평가로 확장하는 것은 어려움이 있는 것으로 사료된다. 보호시스템의 관점에서의 보호능력 평가는 fuzzy measuring 기법을 이용한 연구가 발표된 바 있다[5]. 이 연구에서는 개별 보호기뿐만 아니라, 보호기간 협조에 대한 보호능력 평가방안이 제시되었다. 이 연구에서는 계층적 평가모델을 제안하여, 단위 기기와 협조 관점의 보호능력을 구분하여 평가할 수 있도록 하였다. 그리고 각 평가항목을 모호논리에 근거한 평가지수(fuzzy measure)로 계량화하고, 이들을 Dempster-Shafer의 결합률을 이용하여 전체 보호시스템의 보호능력을 산정하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 보호기의 변경이나 추가, 계통 구조의 변경 등 설비 계획 단계에서는 적용에 한계가 있는 것으로 사료된다.

본 논문에서는 각 보호기의 보호 파라미터 관점에서 개별 보호기 및 보호 시스템의 보호능력을 평가하는 방법을

\* 正 會 員 : 明知大學 電氣工學科 研究教授 · 工博

\*\* 正 會 員 : 明知大學 電氣工學科 教授 · 工博

\*\*\* 正 會 員 : 明知大學 電氣工學科 碩授課程

接受日字 : 2003年 11月 10日

最終完了 : 2004年 3月 15日

제시하고자 한다. 먼저 보호 파라미터를 설정하기 위한 여러 규칙들에 대하여, 현재 보호기기가 갖는 파라미터 값이 해당 규칙을 만족하는 정도를 정량화하여 보호능력을 평가한다. 이 때, 개별 보호기기 및 보호기기간의 협조관계를 구분하기 위하여 규칙들을 이에 맞도록 분류하였으며, [5]에서 제안된 계층적 보호도 평가 모델을 이용하였다. 제안된 방법은 계통 운용뿐만 아니라 계획단계에도 적용할 수 있으며, 평가가 간단한 구조로 이루어져, 향후 전력계통 보호에 적용성을 부여하고자 할 때 활용될 수 있도록 하였다.

본 논문은 총 5장으로 이루어진다. 2장에는 본 논문이 제안하는 보호능력 평가의 개념이 정의되고, 3장에 제안된 파라미터에 근거한 보호도 산출방법이 설명된다. 4장에는 사례연구를 통하여 제안된 방법의 유용성을 보이고, 마지막으로 결론과 향후 연구과제들이 5장에 기술된다.

## 2. 문제의 정의

전력계통의 보호는 전력계통에 사고가 발생했을 때, 이를 건전한 계통으로부터 가장 빠른 시간에 분리하고, 정전구역을 최소화하는 것을 목적으로 한다. 그리고 이러한 목적을 달성하기 위하여 각종 보호기기들이 장치되며, 각 보호기기들은 운영조건에 맞추어 적절한 파라미터 값들을 갖도록 설정되어 있다. 여기서, 보호기기의 파라미터라 함은 “보호 성능에 영향을 주며, 변경이 가능한 값”을 의미한다. 과전류 계전기의 최소동작전류 탭이나 타임 다이얼, 리클로저의 MTR(Minimum Trip Rating) 등이 보호 파라미터의 예이다. 각 파라미터 값의 설정은 운영자에 의하여 결정된 규칙들에 따르는 것이 일반적이다. 이 규칙들은 전력계통 보호를 이루기 위하여 해석과 운영상의 경험에 근거하여 구축된 것으로, 보호시스템의 보호능력의 우수성 여부는 이 규칙들이 얼마나 잘 만족되는가에 달려있다고 볼 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 각 보호기기의 파라미터들이 그것을 설정하기 위한 규칙들을 얼마나 잘 만족하고 있는지를 산정하고, 이들을 결합하여 단위 보호기기, 혹은 전체 보호시스템의 보호능력을 평가하는 방법을 제안하고자 한다.

위의 개념을 수식을 이용하여 표현하면 다음과 같다. 편의를 위하여 보호기기를 대문자  $D$ 로, 보호기기의 파라미터를 소문자  $p$ 로, 그리고 규칙을 대문자  $R$ 로 정의하기로 한다. 그리고 위 첨자는 보호기기, 또는 규칙의 인덱스를, 아래 첨자는 파라미터의 인덱스를 의미하는 것으로 정의한다. 예를 들면  $R^k$ 는  $k$ 번째 규칙을 나타내며,  $D^j, p_k^j$ 는 각각  $j$ 번째 보호기기와  $j$ 번째 보호기기의  $i$ 번째 파라미터를 의미한다.

현재 파라미터의 값이 해당 파라미터를 설정하는 데 적용되는 규칙에 얼마나 충실하게 설정되었는지를 평가하는 지표를 ‘적합도’라 정의한다.  $p_k^j$ 를  $j$ -보호기기의  $k$ 번째 파라미터라 하고, 이 값을 결정하는 데 적용되는 규칙 중에  $R^i$ 가 있다면 적합도는  $R^i(p_k^j)$ 와 같이 파라미터의 함수로 표현될 수 있다.

또한, 임의의 보호기기  $D^j$ 의 보호능력  $P^j$ 는 다음과 같이 각 파라미터의 적합도를 이용하여 표현할 수 있다.

$$P^j = f(R^i(p_k^j)), \text{ for all } i \text{ and } k \quad (1)$$

여기서  $i$ 와  $k$ 는 각각 기기  $D^j$ 의 파라미터를 결정하는데 적용되는 규칙들의 인덱스 집합과 기기  $D^j$ 의 파라미터 인덱스 집합을 의미한다.

이와 같이, 본 논문에서는 보호시스템의 보호능력을 보호기기의 파라미터들이 이를 설정하는데 적용되는 규칙들을 충실하게 만족하는가 하는 관점에서 평가하고자 한다. 자세한 평가방법은 3장에 설명한다.

## 3. 보호능력의 산출

### 3.1 파라미터 설정 규칙과 적합도

2장에서 설명한 바와 같이, 보호시스템의 보호능력은 단위 보호기기의 파라미터로부터 전체 시스템에 이르는 보호능력 평가 과정에서 단위 보호기기, 보호기기간의 협조, 그리고 전체 시스템 순으로 절차를 모듈화 하게 되면 계산의 효율성을 극대화할 수 있을뿐만 아니라, 보호기기별, 또는 보호기기간 협조, 단위별 보호능력을 각각 도출할 수 있어 부분적인 판단이나 정정에도 유용하게 이용될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 보호능력을 평가하는 데 있어 효율을 높이기 위하여 규칙들을 다음과 같이 세 종류로 분류하였다.

- i) Single Parameter Rules(SPR) : 이 범주에 속하는 규칙들은 하나의 보호기기의 하나의 파라미터에 적용되는 규칙이다.
- ii) Multi-Device Rules(MDR) : 이 규칙들은 서로 다른 두개 이상의 보호기기에 동시에 적용되는 규칙들이다.
- iii) Multi-Parameter Rules(MPR) : 하나의 보호기기에 있는 둘 이상의 파라미터에 적용되는 규칙들의 집합이다.

SPR과 MPR은 개별 보호기기의 보호능력을 평가할 수 있는 규칙들이다. 반면에 MDR은 적용되는 보호기기들 사이의 협조능력을 평가한다. 따라서, 각 단위 기기별로 SPR과 MPR의 규칙에 대한 적합도와 MDR에 대한 적합도를 각각 구하게 되면, 개별 보호기기의 독자적 보호능력과 타 보호기기와의 협조능력으로 구분하여 구할 수 있으므로, 보호기기 파라미터 정정시에 사용할 수 있다. 다음에는 각 규칙에 대한 현재 보호기기의 파라미터 값의 적합도를 구하는 방법을 설명한다.

#### 3.1.1. SPR의 적합도 산정

보호기기 정정 규칙은 일반적으로 각 파라미터가 가져야 하는 범위와 그중에서 가장 적합한 값을 규정하고 있다. 예를 들어 과전류 계전기의 차단전류는 최소 고장전류보다는 작아야 하고, 최대 부하전류보다는 커야하며, 우리나라의 경우, 최대 부하전류의 1.5배를 권장하고 있다. 따라서, 이 규칙에 의하면, 과전류계전기의 차단전류는 부하전류의 1.5배가 되도록 설정되는 것이 가장 적합한 것이며, 이 값에서 멀어질수록 적합도는 작아져야 한다.

이와 같이 각 규칙에 대한 파라미터의 적합도는 다음과 같은 속성을 갖는 것이 타당하다.

- i) 파라미터의 유효영역 경계점에서 적합도는 낮은 값을 가져야 한다.
- ii) 파라미터의 최적점에서 적합도는 최대값(본 논문에서는 1)을 가져야 한다.
- iii) 파라미터가 경계점에서 최적점으로 이동함에 따라 적합도는 단조증가 하여야 한다.

본 논문에서는 규칙에 대한 파라미터의 적합도를 나타내는 함수로서 정규분포 함수를 이용하여 정의하였다. 이를, 과전류계전기의 차단전류의 예를 들어 설명하면 다음과 같다. 차단전류를 설정하는 규칙중에는 위에 기술한 바와 같이 한시 차단전류의 상한과 하한, 그리고 권장치를 규정하는 규칙이 있으며, 여기에는 해당 과전류계전기의 한시 램만이 관계되므로, 이 규칙은 SPR이다.

우선, 최소동작전류의 하한치, 상한치, 권장치를 각각  $I_{pick-Min}$ ,  $I_{pick-Max}$ , 그리고  $I_{pick-Opt}$ 라 정의하면, 이들 간에는 다음 관계가 있다.

$$I_{pick-Min} \leq I_{pick-Opt} \leq I_{pick-MAX} \quad (2)$$

따라서,  $I_{pick-Opt}$ 를 중심으로  $I_{pick-Min}$ 의 방향과  $I_{pick-MAX}$ 으로 나누어 각각의 구간에 해당하는 sigmoid 함수를 구한다. 각각의 sigmoid 함수를 구하는데 있어  $I_{pick-Opt}$ 에서의 적합도 값과,  $I_{pick-Min}$ , 또는  $I_{pick-MAX}$ 에서의 적합도 값이 경계조건이 된다. 먼저  $I_{pick-Min}$ 를 포함하는 구간의 함수를 구해보면,  $R(p) = 1/(1 + \exp(a(p-b)))$ 에서 다음 경계조건을 만족하는  $a$ 와  $b$ 를 구한다.

$$R(I_{pick-Min}) = \alpha_1 \quad (3-1)$$

$$R(I_{pick-Opt}) = 1, \quad (3-2)$$

여기서  $0 < \alpha_1 < 1$ ,  $p \leq I_{pick-Opt}$

위 (3)을 만족하는 함수  $R_1(p)$ 는  $I_{pick-Opt}$ 보다 작은 구간의 적합도 함수이다.  $I_{pick-Max}$ 를 포함하는 구간의 적합도 함수  $R_2(p)$ 도 식 (3-2)와 다음의 경계조건으로부터 같은 방법으로 구할 수 있다.

$$R(I_{pick-Min}) = \alpha_2 \quad (4)$$

여기서  $0 < \alpha_2 < 1$ ,  $p \geq I_{pick-Opt}$

위의 두 함수  $R_1(p)$ 와  $R_2(p)$ 를 결합하면 하나의 적합도 함수  $R(p)$ 를 구할 수 있으며, 이때,  $I_{pick-Opt}$ 에서의 경계조건을 두 경우 꼭 같이 주었으므로  $R(p)$ 는 연속함수를 이루게 된다. 그림 1은 이와 같이 구한  $R(p)$  함수이며,

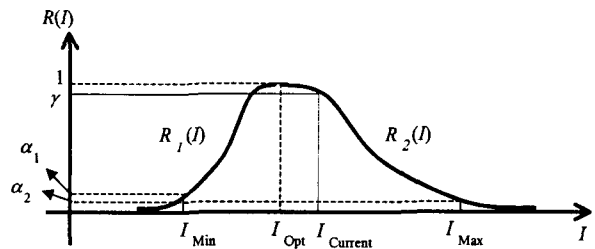


그림 1 SPR에 대한 적합도 함수의 설정

Fig. 1 Fitness function of SPR

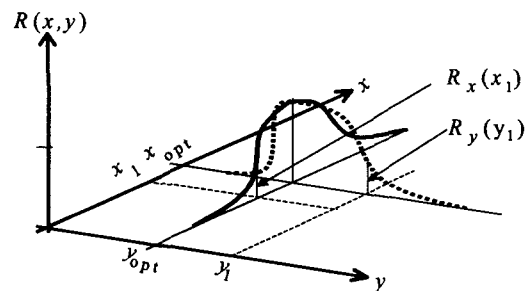


그림 2 MPR에 대한 적합도 함수의 설정

Fig. 2 Fitness function of MPR

그림에서 만일 현재 과전류계전기의 차단전류가  $I_{Current}$  값으로 설정되어 있다면, 이 규칙에 대한 적합도는  $\gamma$ 임을 보여주고 있다.

### 3.1.2 MPR의 적합도 산정

MPR은 동일한 보호기기의 두 개 이상의 파라미터를 설정할 때 적용되는 규칙들의 집합이다. 여기에 해당되는 가장 대표적인 규칙은 보호기기가 보호하는 계통의 범위에 관한 규칙이다. 즉, 각 보호기기는 일정 용량 이내의 부하, 또는 일정 길이 이내의 선로의 보호를 담당하도록 하여야 한다. 보호 길이가 너무 짧게 되면, 보호기기 구입 및 설치에 따른 비용도 많이 소요될 뿐만 아니라, 보호기기간의 협조에도 문제가 발생할 수 있다. 반면에 거리가 너무 길게 되면 보호의 신뢰성이 떨어지는 것은 자명하다. 따라서 한국전력에서는 배전선로 보호를 위한 각 보호기기의 보호 거리와 용량에 상/하한을 두고 있다. 본 논문에서는 이들을 결합하여 하나의 규칙으로 처리하였다. 이에 대한 적합도를 정의하는 과정은 다음과 같다.

편의상  $x$ 와  $y$ , 두 개의 파라미터에 대하여 적용되는 규칙을 가정한다. 규칙은 두 파라미터의 범위와 최적치를 규정하고 있다. 이 경우 파라미터  $x$ ,  $y$ 에 대하여 각각의 적합도 함수  $R_x(x)$ 와  $R_y(y)$ 는 3.1.1에 설명한 바와 같은 방법으로 구한다. 현재 설정된 파라미터의 값이 각각  $x$ ,  $y_1$ 이라 하면, 각 파라미터의 적합도  $R_x(x_1)$ ,  $R_y(y_1)$ 를 계산하여 이들의 조합으로부터 이 규칙에 대한 적합도를 산출할 수 있다. 본 논문에서는 이 중 작은 값을 이 규칙에 대한 현재 파라미터의 적합도로 정의하였다. 그림 2는 MPR에 대한 적합도 산출 예를 보이고 있다.

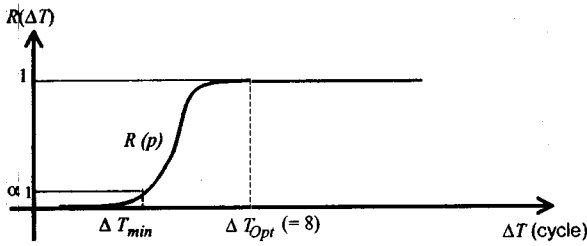


그림3. 리클로저간 시간협조 조건에 대한 적합도 함수.  
**Fig. 3.** Fitness function for time-coordination condition between two reclosers.

**3.1.3 MDR의 적합도 산정**

MDR은 두개 또는 그 이상의 보호기기들 간의 협조 조건을 규정한 규칙들의 집합으로, 보호기기간의 동작 시간차가 대표적인 예이다. 이 경우, 평가할 수 있는 지표는 두 기기의 동작시간차이나, 이 특성을 결정하는 파라미터는 각 보호기기의 동작시간을 결정하는 요소, 즉, 과전류계전기에서는 Tap과 Time dial(동작특성곡선), 그리고 리클로저에서는 MTR 등이다. 각 파라미터들의 값이 결정되면 각 보호기기 고유의 전류-시간 특성곡선(Time-Current Characteristic Curve : TCC Curve)에 의하여 특정 전류에서 각 보호기기의 동작시간이 결정되며, 이 동작 시간의 차이가 평가의 지표가 된다. 따라서 이 규칙은 MDR이 되며, 4개의 파라미터가 결합되어 그 특성을 결정한다.

예를 들어 3상 유압식 리클로저간의 협조조건은 “부하측 보호기기의 구간내 사고전류에 대하여 전원측 보호기기의 동작시간은 부하측 보호기기보다 8 cycle 이상 늦게 동작하여야 한다”는 규칙이 있으며, 이 규칙은 제안된 방법에서는 그림 3과 같은 적합도 함수로 표현된다.

두 리클로저의 파라미터들이 결정되면, 각 기기의 TCC curve를 이용하여 부하측 보호기기의 보호구간 고장시의 고장전류에 대한 동작시간을 구할 수 있고, 이 들의 차이로부터 위의 적합도 함수에 의하여 협조 보호능력을 평가할 수 있다.

**3.2 각 규칙에 대한 적합도의 결합**

3.1에서 각 규칙에 대하여 현재 보호기기의 파라미터값들의 적합도를 구하는 방법을 기술하였다. 이제, 규칙단위의 적합도를 결합하여 전체 보호시스템의 적합도를 산출하는 방법을 설명한다. 전술한 바와 같이 본 논문에서는 규칙들을 개별 보호기기에 대한 규칙들과 기기간의 협조에 대한 규칙으로 분류하였다. 이는 전체 보호도 연산 과정에서 개별기기의 능력과 협조능력을 구분하여 현 보호시스템의 장단점 파악을 용이하게 하기 위한 것이다. 따라서, 먼저 개별 보호기기들의 보호능력을 평가하고, 보호기기간의 협조능력을 평가한 후, 이들 결과를 모두 결합하여 전체 시스템의 보호능력을 평가하는 계층적 연산모델을 택하였다.

**3.2.1 개별 보호기기의 보호능력**

각 개별 보호기기의 보호능력은 2.2에 설명된 바와 같이 규칙베이스의 SPR과 MPR에 대한 현재 파라미터의 적합도 연산과 그 결합으로 이루어진다. 그 과정을 요약하면 다음과 같다.

i) 보호능력을 계산하고자 하는 보호기기의 파라미터를 도출한다.

- ii) 해당 파라미터를 결정하는데 이용되어야 하는 규칙들을 규칙베이스의 SPR과 MPR에서 선택한다.
- iii) 선택된 각 규칙들에 대하여 계통 운영조건에 맞추어 파라미터의 상한, 하한 및 최적값을 계산하여 적합도 함수를 구한다.
- iv) 이로부터 해당 파라미터의 각 규칙에 대한 적합도를 산출한다.
- v) 하나의 보호기기에 존재하는 각 파라미터들에 적용된 모든 규칙들의 적합도에 대하여 선형합을 구한다. 이 결과가 개별 보호기기의 보호능력지수이다.

$i$  번 보호기기가  $i_n$ 개의 파라미터를 가지고 있다면, 이 경우 개별 보호능력  $P_i$ 은 다음과 같다.

$$P_i = \sum_{k=1}^{i_n} \sum_{j \in SPI_k} w_j^S \cdot SPR_k(P_k^i) + \sum_{j \in MPI_k} w_j^M \cdot MPR_k(P_k^i, P_m^i) \quad (5)$$

여기서,  $SPI_i$ ,  $MPI_i$ 는 각각  $i$ 번 보호기기의 파라미터들이 적용되는 모든 SPR과 MPR 규칙들의 인덱스 집합이며,  $w_j^S$ ,  $w_j^M$ 은 각 규칙에 대하여 정의된 계수이다. 이 계수들은 보호기기에 따라 적용되는 규칙의 수에 따라 정규화하여 기기간의 상대적인 보호능력을 비교할 수 있게 하기 위함이다. 또한, 규칙별로 상대적 크기를 달리하여 규칙의 중요도를 반영할 수 있다. 다음 그림 3은 3개의 파라미터를 갖는 1번 보호기기가 규칙  $SPR_1$ ,  $SPR_2$ ,  $SPR_3$  및  $MPR_2$  등의 규칙에 대한 적합도값을 구하여 개별 보호기기의 보호능력을 산정하는 과정을 나타내는 평가 모델의 예이다.

**3.2.2 보호협조 능력**

보호협조 능력은 각 파라미터들의 MDR 규칙들에 대한 적합도에 의하여 평가된다. 보호능력을 산정하는 과정은 개별보호기기와 동일하며, 다만 협조관계에 있는 두 보호기기들의 파라미터들이 고려된다는 점만 다르다. 그림 4는 보호기기  $i$ 와  $k$  기기간의 보호협조 능력을 산정하는 모델이다.

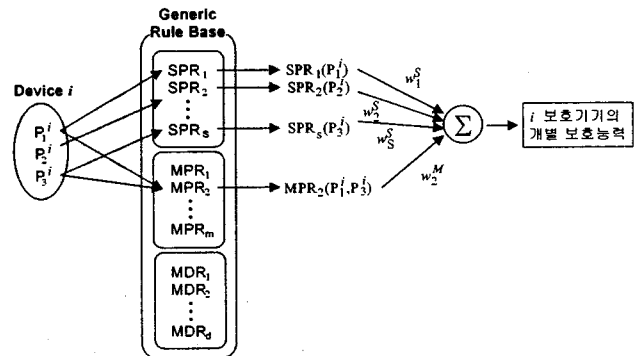


그림 4 개별 보호기기의 보호능력 산출 모델  
**Fig. 4** Device-wise protective effectiveness assessment model

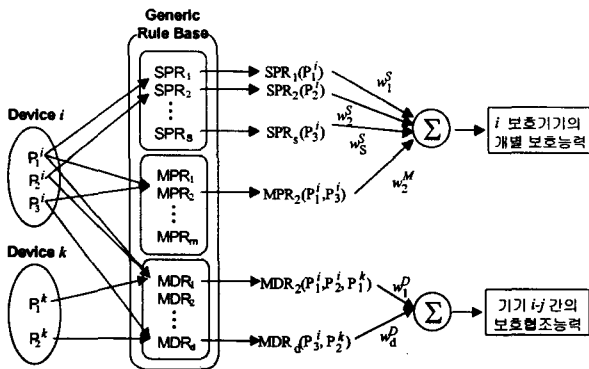


그림 5 보호기기간의 협조능력 산출 모델  
 Fig. 5 Coordination-wise protective effectiveness assessment model

$i$  번 기기의  $P_1^i, P_2^i$  와 기기  $k$  의  $P_1^k$  등의 협조에 관한 조건을 규정하는 규칙이  $MDR_{ij}$  이고, 따라서 이 규칙에 대한 적합도를 산정하고 있다.  $MDR_{ij}$  에 대해서도 같은 요령으로 설명할 수 있다. 회색부분은 앞 절에 설명한 개별 보호기기  $i$  의 보호능력이다.

3.2.3. 보호시스템의 보호능력

보호시스템의 보호능력은 그 시스템을 구성하는 각 보호기기들의 보호능력과 보호기기간의 협조능력에 의하여 결정된다. 시스템의 보호능력  $PI$  는 다음 식에 의하여 구할 수 있다.,

$$PI = \sum_{i \in S} w_i P_i + \sum_{j,k \in C} w_{j,k} P_{j,k} \quad (6)$$

여기서  $S, C$  는 각각 해당 보호시스템을 구성하는 보호기기들의 인덱스 집합과 보호기기간의 협조관계를 갖는 보호기기 쌍의 인덱스 집합이다. 그리고,  $w_i, w_{j,k}$  는 각 항에 대한 가중계수로, 보호기기마다, 그리고 협조관계를 갖는 보호기기 쌍마다 중요도를 달리 할 수 있도록 하기 위함이다.

4. 사례 연구

여기서는 두 가지 사례연구를 통하여 제안된 보호능력 평가 방안의 타당성 및 활용도를 보이고자 한다. 4.1절에서는 동일한 예제 배전계통에서 두 개의 파라미터 집합에 대하여 보호능력을 비교하고, 4.2절에서는 배전계통에서 보호능력이 현저하게 낮은 부분을 찾아내고 이를 개선하기 위하여 보호기기를 추가하고자 할 때, 제안된 방법을 이용하여 전체 보호시스템의 보호능력을 극대화할 수 있는 위치를 찾을 수 있음을 보이고자 한다.

4.1 정정치 변경

다음 그림 5과 같은 배전계통을 가정하자. 그림에서 선로

상의 사각형은 보호기기를 나타내며, O는 OCR, R은 리클로저, F는 퓨즈를 각각 의미한다. 3번, 5번 노드는 분기점이며, 10, 11 및 12번 노드는 선로의 종단이다. 부하는 편의상 거리에 비례하여 일정하게 분포한 것으로 가정하였다.

보호기기의 파라미터 값은 두 가지 방법으로 선정하였다. 첫 번째는 개별 보호기기만의 데이터를 이용하여 각각의 최적 파라미터를 선정하였고, 두 번째는 여기에서 인접 보호기기간의 협조조건을 고려하여 파라미터 일부를 수정하였다. 다음 표 1과 2는 각 두 경우의 파라미터 값과 보호도 연산 결과이다.

표 1에서, 첫 번째 방법에 의하여 파라미터를 선정한 경우, R4와 상위의 R2 사이의 협조능력이 매우 낮으며, 또한, 퓨즈 F6과 F7 사이의 협조능력도 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 그러나 퓨즈의 경우는 파라미터의 변경은 곧 설치된 퓨즈의 교체를 의미하므로 본 논문에서는 논외로 하기로 한다. 따라서, 위의 예에서 보호능력을 증가시키기 위해서는 리클로저의 파라미터를 변경하는 것이 타당하다. 리클로저 R2와 R4 사이의 협조관계는 R4 보호구간의 사고에 대하여 동작시간이 8 cycle 이상이 되는 것이 바람직하다. 그러나 초기 설정된 파라미터에 의하면 두 리클로저의 시간차는 2.2 cycle이며 이는 기준치에 크게 미치지 못하는 결과이다. 즉, R4 보호구간의 사고에 대하여 R2가 지나치게 민감하게 반응할 수 있으며, 이것이 표 1에서 R2와 R4 사이의 협조 보호능력 값이 0에 가까운 값으로 산출된 원인이다.

표 2는 초기 설정치 중 R2의 MTR을 높여가면서 전체 보호도가 가장 높아지는 점을 탐색하여 얻은 결과이다. 표 1과 2를 비교해 보면, R2의 MTR이 초기에 357[A]에서 422[A]로 높아졌으며, 이에 따라 R2 개별 보호능력은 0.987에서 0.945로 낮아졌으나 R2와 R4간의 협조 보호능력은 0에서 1로 증가하였음을 볼 수 있다. 이를 상세히 분석해 보면, 우선 협조능력의 경우, 정정된 경우의 R2와 R4의 동작시간차는 10.3cycle이며 이는 규정상 동작시간 차, 즉 8cycle을 충분히 만족하는 결과이다. R2의 개별 보호능력의 경우, MTR이 증가에 따라 감소하였는데, 이는 초기 설정치들이 SPR들만을 고려하였음을 고려하면 자연스러운 결과이다.

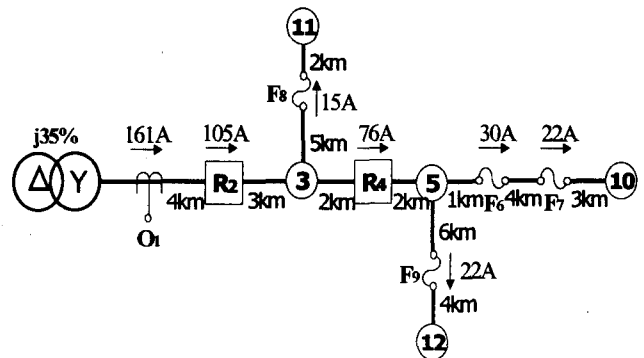


그림 6 예제 배전 계통 1  
 Fig. 6 Example distribution system

표 1 보호기기 단독 정정 결과  
Table 1 Setting values of each device

기기/파라미터	파라미터 값	기기 보호능력	협조 보호능력
O1	순시탭(지락)	4000 [A]	0.967
	한시탭(지락)	120 [A]	
	Lever(지락)	2.5	
	순시탭(상)	5687 [A]	
	한시탭(상)	600 [A]	
	Lever(상)	2.0	
R2	MTR(지락)	31 [A]	1.000
	MTR(상)	357 [A]	0.001
R4	MTR(지락)	23 [A]	0.949
	MTR(상)	265 [A]	1.000
F6	정격전류	20 [A]	0.863
F7	정격전류	15 [A]	1.000
F8	정격전류	10 [A]	1.000
F9	정격전류	15 [A]	1.000
전체 보호도			3.715

표 2 협조를 고려한 정정 결과  
Table 2 Setting values that consider protection coordination

기기/파라미터	파라미터 값	기기 보호능력	협조 보호능력
O1	순시탭(지락)	4000 [A]	0.967
	한시탭(지락)	120 [A]	
	Lever(지락)	2.5	
	순시탭(상)	5687 [A]	
	한시탭(상)	600 [A]	
	Lever(상)	2.0	
R2	MTR(지락)	31 [A]	0.945
	MTR(상)	422 [A]	0.999
R4	MTR(지락)	23 [A]	0.949
	MTR(상)	265 [A]	1.000
F6	정격전류	20 [A]	0.863
F7	정격전류	15 [A]	1.000
F8	정격전류	10 [A]	1.000
F9	정격전류	15 [A]	1.000
전체 보호도			4.097

그러나 리클로저의 개별 보호능력을 규정하는 규칙은 여러 가지가 있으며, 각 규칙에 대한 최적 파라미터들이 일치하는 것은 아니기 때문에 MTR이 증가에 비례하여 개별 보호능력이 감소하지는 않음을 알 수 있다. 실제로 MTR이 증가하면 보호구간 내의 상간 단락에 대한 감도 규칙의 적합도는 감소되나 돌입전류에 대한 감도 규칙의 적합도는 증가함을 확인할 수 있으며, 결과적으로 개별 보호능력은 약 4% 감소하였다.

요약하면 리클로저 2의 MTR을 조정하여, 개별 보호능력은 약간 저하되나, 협조 능력이 크게 향상되어 전체 보호도가 향상됨을 알 수 있다. 이 때, 협조조건을 만족하는 리클로저 2의 MTR의 해집합은 구간으로 나타나며 따라서 무수히 많은 해를 갖는다. 그러나 제안된 방법에 의하여 각 해에 대한 보호도가 평가되므로 가장 높은 보호능력을 도출하는 해를 찾을 수 있다.

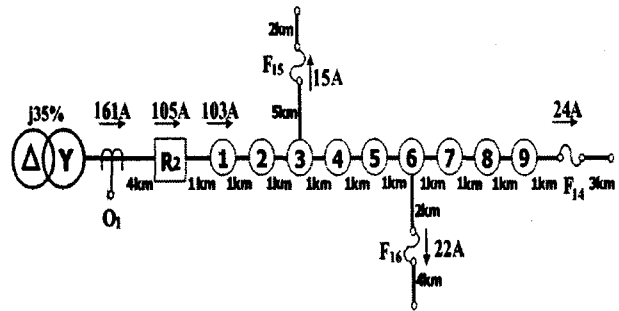


그림 7 예제 배전 계통 2  
Fig. 7 Example distribution system 2

#### 4.2 보호기기의 추가

다음은 배전선로 보호시스템의 변경에 의하여 보호능력을 향상시키는 예이다. 그림 7의 예제계통에서 보호능력을 계산하면 리클로저 2의 보호도는 0.65이고 전체 보호도는 2.81이다. 리클로저 R2의 보호능력이 상대적으로 상당히 낮으며 이는 이 기기가 부담해야 하는 보호구간이 너무 크기 때문이다.

이제 리클로저 R2와 퓨우즈 F14사이에서 새로운 리클로저를 추가하여 보호능력을 향상하고자 한다. 노드 1에서 노드 9는 새로운 리클로저의 설치위치 후보지를 나타내며 각 위치에 새로운 리클로저를 설치하였음을 가정할 때의 보호도를 산정한 결과가 표 3에 제시되어 있다. 추가되는 리클로저의 MTR은 각 위치에서 보호도 지수를 최대로 하는 값을 산정하였다.

리클로저의 설치위치가 노드 1에 가까울 경우는 리클로저 R2의 보호구간이 너무 좁아져서 역할이 축소되고 추가 리클로저와 보호협조가 어려워지며, 추가 리클로저는 너무 넓은 보호범위를 담당하게 되어 보호능력이 떨어지는 단점이 있다. 물론 추가 리클로저와 전위 퓨우즈간의 보호협조가 용이한 장점은 있다. 반대로 설치위치가 노드 9에 가까운 경우에는 리클로저 R2의 보호구간이 너무 넓어서 보호능력이 떨어지고, 추가 리클로저는 보호구간이 너무 좁으며 전위 퓨우즈와 보호협조가 어려운 단점이 있으나 추가되는 리클로저와 기존 리클로저 R2간의 보호협조는 용이하다.

따라서 두 리클로저의 보호범위가 각각 적당히 배분되고 보호협조가 용이한 최적의 설치위치는 어느 한쪽으로 치우치지 않고 가운데쯤에서 찾아질 가능성이 높다. 표3은 모든 설치위치 후보에 대하여 각 보호기기의 개별 보호능력 및 협조능력을 나타내고 있다. 기기별 보호도 지수를 살펴보면 앞서 설명한 설치위치별 장단점을 정량적으로 나타내고 있음을 알 수 있으며, 선로 종합 보호도 지수로 보아 노드 5가 새로운 리클로저를 추가하기에 가장 적합한 설치위치인 것으로 판단할 수 있다.

이상의 사례연구에서 본 바와 같이, 본 논문에서 제시한 보호능력 평가지수는 기존의 언어적 규칙으로 표현된 정정 규칙에 의하여 도출된 각 파라미터의 가능해의 집합에서, 최적의 파라미터 값을 산정할 수 있으며, 계통 운용상황의 변화 등에 의하여 보호시스템의 구조나 파라미터 변경이 요구될 경우, 최적의 해를 찾기 위한 지표로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

표 3 리클로저 위치에 따른 보호도 변화

Table 3 Protectability change through the recloser position

리클로저 추가위치	R2	추가 리클로우저			F14	F15	F16	보호도 지수
	개별	개별	협조	협조	협조	협조		
1	0.647	0.697	0.012	1.000	1.000	1.000	3.082	
2	0.647	0.697	0.023	1.000	1.000	1.000	3.087	
3	0.872	0.943	0.628	1.000	1.000	1.000	3.517	
4	0.893	0.922	0.862	1.000	1.000	0.999	3.610	
6	0.649	0.698	0.999	0.023	1.000	1.000	3.283	
7	0.647	0.697	1.000	0.013	1.000	1.000	3.279	
8	0.647	0.697	1.000	0.007	1.000	1.000	3.278	
9	0.647	0.697	1.000	0.005	1.000	1.000	3.278	

5. 결 론

본 논문에서는 배전계통 보호시스템의 보호능력을 평가하는 방법을 제안하였다. 각 보호기기의 파라미터를 정의하고, 각 파라미터의 값을 선정하는 규칙들에 대하여 현재 파라미터 값이 적합한 정도를 계량화하여, 이들을 결합함으로써 전체적인 보호능력을 평가할 수 있다. 개별 파라미터의 적합도로부터, 보호기기, 협조능력 그리고 전체 보호 시스템 순으로 보호능력을 계층적으로 산출하는 방법을 이용하여 각각의 정보를 필요시에 이용할 수 있다.

예제계통에 대한 사례연구를 통하여 제안된 방법이 보호시스템의 보호능력을 평가하고, 개별 보호기기의 파라미터를 정정하는 데 이용될 수 있음을 보였다. 본 논문에 제안된 방법은 보호능력 평가 지수는 파라미터 값에 대한 해석 함수로 정의하였으므로, 향후 최적 파라미터 선정을 기계적으로 수행할 수 있는 알고리즘을 개발하면 더욱 유용할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] M. Kezunovic, et al, "Design Optimization and Performance Evaluation of the Relaying Algorithms, Relays and Protective Systems Using Advanced Testing Tools", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, No. 4, Oct., 2000.  
 [2] O.E.Schweitzer III, et al, "Statistical Comparison and Evaluation of Pilot Protection Schemes", Proc. of the 23rd Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, Oct., 1996.  
 [3] E. A. Arden, et. al, "Proposed Statistical Performance Measures for m-Processor-based Transmission Line

Protective Relays, I and II", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, Jan, 1997

[4] B. Kasztenny, et al, "Digital Protective Relaying Algorithm Sensitivity Study and Evaluation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, July., 1988.  
 [5] S. J. Lee, et al, "A New Evaluation Methodology for System of Primary Distribution Systems Considering Multi-Factors Based on Dampster's Combination Rule", Trans. of KIEE, Vol. 48. No.11, Nov., 1999.  
 [6] Korea Electric Power Co-operative, Handbook of Protective Relay, 1996.  
 [7] Application and Coordination of Reclosers, Sectionalizers and Fuses, IEEE Tutorial.

저 자 소 개

현 승 호(玄升鎬)



1962년 서울생. 1991, 서울대학교 공과대학 전기공학과, 1993, 동 대학원 전기공학과(공학석사), 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996-2002년 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단 시스템개발팀장, 2002-현재 명지대학교 전기공학과 차세대 전력기술연구센터 연구교수. 주 관심분야 : 전력계통 지능보호 및 제어, 인공지능의 전력계통 응용

Tel.: 031-330-6814, Fax.: 031-330-6816  
 E-mail : takeitez@mju.ac.kr

이 승 재(李承宰)



1955년 11월 30일생. 1979년 서울대 공과대학 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 Univ. of Washington 전기공학과 졸업(공학박사). 1994년 Univ. of Washington 교관교수. 현재 명지대 공과대학 전기공학과 교수. 주 관심분야 : 전력계통 지능보호 및 제어, 인공지능의 전력계통 응용, 배전자동화, 변전소자동화

Tel : 031-336-6362, Fax : 031-330-6816,  
 E-mail : sjlee@mju.ac.kr

임 성 일(林星日)



1994년 명지대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 1996년 동 대학원 전기공학과 석사, 2004년 동 대학원 전기공학과 박사. 1996-2002년 한국전력공사 전력연구원 근무, 2004-현재 명지대학교 전기공학과 차세대 전력기술연구센터 연구교수. 주 관심분야 : 전력계통 보호 및 자동화

Tel.: 031-330-6819, Fax.: 031-330-6816  
 E-mail : lim7610@mju.ac.kr



**최인선(崔仁善)**

2002년 명지대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 현재 동대학원 전기공학과 석사과정.  
주 관심분야 : 전력계통 보호, 배전자동화, 변전소자동화, 전기품질  
Tel.: 031-336-3290, Fax : 031-330-6816,  
E-mail : cis226@mju.ac.kr



**신재항(申在恒)**

2003년 세명대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 현재 명지대학교 대학원 전기공학과 석사과정.  
주 관심분야 : 전력계통 보호, 변전소자동화  
Tel.: 031-336-3290, Fax : 031-330-6816  
E-mail : dragonsjh@hanmail.net



**최면송(崔勉松)**

1967년 4월생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 전기공학과 졸업(공학박). 1995년 Pennsylvania State Univ. 방문연구원. 1992년 기초전력공학 공동연구소 전임연구원. 현재 명지대학교 공대 전기공학과 부교수. 주 관심분야 : 계통보호, 인공지능의 전력계통 응용  
Tel : 031-336-6367, Fax : 031-330-6816  
E-mail : mschoi@mju.ac.kr