

효율적인 휴리스틱들을 가지는 선로 자동화 전문가 시스템

고 윤석^{*}, 김호용^{*}, 장정태^{**}, 하복남^{**}
(^{*}한국전기연구소, ^{**}한전기술연구원)

An Expert System for Feeder Automation with Efficient Heuristics

Yun-Seok Ko^{*}, Ho-Yong Kim^{*}, Jung-Tae Jang^{**}, Bog-Nam Ha^{**}
(Korea Electrotechnology Research Institute, "Korea Electric Power Corporation)

ABSTRACT

This paper proposes an expert system with improved heuristics in order to enhance convergence rate to the optimal solution when an emergency problem occurs in the automated large scale distribution system. These heuristics, which are obtained from the line loss and load balancing change after a line section transferred, are newly adopted for the emergency problem.

Key Words: Distribution Automation System
Expert System, Service Restoration

1. 서 론

일반적으로, 배전계통은 고밀도 수용가 지역등을 아주 폭넓게 그리고 직접적으로 경유하기 때문에, 정전문제가 자주 발생하고 설비규모가 대형화된다. 따라서, 복잡한 보호협조 문제나 설비용량배분으로부터 발생하는 경제적인 문제를 해소하기 위해 전력계통과는 달리 수지상 구조로 운전된다.

배전자동화시스템은 이러한 수지상 구조하에서 비상시 수립된 시스템 재구성(system reconfiguration)전략에 따라 선로상의 개폐기들을 원방에서 제어함으로써 사고파급효과를 최소화할 수 있다. 그러나, 시스템 재구성전략은 대규모 배전시스템상의 수백개이상에 달하는 개폐기들에 대한 조합최적화 문제에 속하기 때문에 대규모 탐색공간 탐색에 의한 실시간 제어전략 수립은 사실상 불가능하다.

따라서, 문헌[1-10]에서는 이러한 대규모 배전계통에 대한 조합최적화 문제를 주어진 시간제약 조건내에서 해결하기 위해 최소화된 탐색공간하에서 최적 또는 준 최적의 해를 얻을 수 있는 휴리스틱 탐색전략들을 제안한다. 특히, 문헌[1]은 자동화된 배전계통의 특성에 따라 운용전략을 결정하고 그 전략에 따라 제어전략을 신속하게 수립할 수 있는 실시간 제어기능을 가지는 인공지능기법에 근거를 둔 종합제어전략 엘고리즘을 제안하였다.

그러나, 일반적으로 휴리스틱 탐색전략들의 최적해에 대한 수립률은 휴리스틱들의 유효성에 좌우된다. 따라서, 본 연구에서는 [11]에서 제안된 종합제어전략의 최적해에 대한 수립율을 개선시키기 위해 보다 정확한 정도를 가지는 휴리스틱들이 개발된다. 특히, 제안되는 휴리스틱들의 유효성을 입증하기 위해 시험 배전계통에 대해서, 개폐기 조작회수 최소화, 주변암기 및 배전선로의 부하분담 균등화, 선로순찰 최소화 등 의 다중 운용목적(multiple objectives)하에서 실시간 해의 최

적해에 대한 정확도를 비교, 검토한다. 여기서, 실시간 해는 휴리스틱에 근거를 둔 최선 우선 탐색법(best-first search)에 의해서 얻어지는 반면에, 최적해는 소모적 탐색법(exhaustive search)에 의해서 얻어진다.

2. 기본개념

배전계통의 수지상 운전구조는 공급 신뢰도 측면에서 취약한 구조이다. 따라서, 잦은 사고나 작업정전으로부터 전력 공급 신뢰도를 확보하기 위해서, 하나의 배전선로를 수개의 구간으로 분할할 수 있도록 수개의 구분 개폐기를(section switches)이 선로상에 설치되며, 또한 다른 배전선로들로부터 전력을 공급 받을 수 있도록 서로 다른 배전선로간에 연계 개폐기(tie switches)이 설치된다. 그럼 1은 다분할 다연계 구조의 대표적인 배전계통 모델을 설명한다.

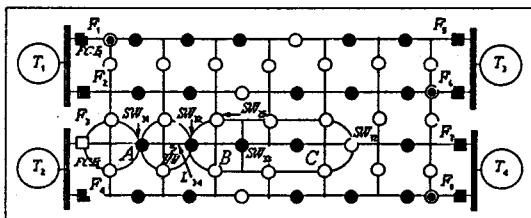


그림 1 대표적인 배전계통 모델

그림 1에서, 모델계통은 4개의 주 변압기와 8개의 배전선로들로 구성된다. ■, □는 투입, 개방 선로 보호용 차단기, ●, ○는 투입, 개방 구분 개폐기, ⊙, ◎는 각각 투입, 개방 다회로 개폐기를 표시한다. T는 주어진 배전계통의 주변암기들의 집합, F는 배전선로들의 집합을 나타낸다. L_i는 F의 i번 째 요소인 F_i의 j번쨰 선로구간을 표시한다. 다회로 개폐기는 3~4개의 투입, 개방 상태를 가지기 때문에 3~4개의 개폐기들이 하나의 분기점에 접속된 구조로 표시된다. 반면에 일반 분기점은 하나의 가상 투입 개폐기가 존재하는 점으로 모델링되나 그림에서는 표시되지 않는다. 배전선로상에서 개폐기와 개폐기 사이를 선로구간으로 정의하며 FCB는 F_i의 선로 보호용 차단기(Feeder Circuit Breaker)를 의미한다.

만약, 배전선로상의 특정구간에서 인위적 또는 들판적인 지락사고가 발생하는 경우, 해당선로의 선로 보호용 차단기나 리클로우저가 고장전류를 감지하여 고장임을 확인하고 보호 협조 메커니즘에 의해 자기 보호구간임을 판단하여 개방됨으

로써 고장구간을 분리하게 된다. 예를들어, F₄상의 네번째 선로구간 L₄에서 지락사고가 발생하는 경우 그 고장구간을 자기보호구간으로 하는 선로 보호용 차단기 가 보호협조 정치에에 근거하여 순시, 지역동작을 행함으로써 순시고장제거를 행한다. 만일, 이 동작에 의해 고장이 제거되는 경우 계통은 정상상태가 유지된다. 반면에, 고장제거에 실패하는 경우 차단기가 영구 개방상태로 됨으로써 타원으로 표시되는 고장구간이하의 전진정전구간들(unfaulted sound zones)은 정전을 경험하게 된다.

선로 사고정전 문제는 이러한 건전 정전구간에 전원을 공급하는 문제로써 먼저, 고장구간을 분리한 다음 부하용통을 행함으로써 해결된다. 고장구간 분리는 고장구간과 적접적으로 연결되는 개폐기들 중 투입상태인 개폐기들의 상태를 개방상태로 변경함으로써 실시된다. 예를들면, 상위 분리자(upper isolator), SW₃,와 하위 분리자(down isolator), SW₂,의 상태를 투입상태에서 개방상태로 변경함으로써 이루어진다. 여기서, 상위 분리자는 고장구간의 전원즉 개폐기를 하위 분리자는 부하측 개폐기를 의미한다. 그리고, FCB,를 재투입하여 부하지역 A에 전력공급을 재개한 다음, 건전 정전구간들에 대한 부하용통을 시도하게 된다. 부하용통(service restoration)은 주어진 운용목적에 따라 건전 정전구간을 분할하여 주위 배전선로들로 절체함으로써 실행된다. 예를들어, 건전 정전구간이 2개의그룹, 부하지역 B와 부하지역 C로 분할된다고 가정하면, 구분 개폐기 SW₃를 투입상태에서 개방상태로, 연계 개폐기 SW₂를 개방상태에서 투입상태로 변경하여 부하지역 B를 배전선로 F₁로 절체하고, 연계 개폐기 SW₂를 개방상태에서 투입상태로 변경하여 부하지역 C를 배전선로 F₂로 절체함으로써 건전 정전구간에 대한 완전한 부하용통이 실시된다. 이 부하절체 과정은 작업정전에 동일하게 적용되며 단지, 개폐기 조작수준에서 무정전 절체를 위해 연계 개폐기가 우선 투입된다. 그리고, 주변압기 사고시 처리는 다중 정전선로 처리전략 즉, 정전문제를 경험하는 수개의 정전선로들에 대해 동일한 전략을 적용함으로써 해결된다.

2.1 개폐기 조작회수 최소화

개폐기 조작회수 최소화는 부하절체를 위해 조작이 요구되는 개폐기들의 수를 최소화하기 위한 목적으로써 식 (1)로 정의된다.

2.2 부하분담 균등화

부하분담 균등화는 계통상의 주변압기나 배전선로들의 이상적 부하와 실제부하의 차를 최소화하는 문제로서 식(2)로 정의된다.

2.3 선로손실 최소화

선로손실 최소화 문제는 선로상에서 발생하는 손실을 최소화하는 문제로 식 (3)으로 정의될 수 있다.

다음은 계통운영제약조건을 보인다.

$$\begin{aligned} TAL_i &\leq TNC_i, \quad i \in T \\ LAL_j &\leq LNC_j, \quad j \in L_i, i \in F \\ \sum_{j \in L(s, e) \setminus i} \sum_{k \in L(s, e) \setminus (i, j)} Z_{jk} &\leq V_i, \quad i \in F \end{aligned}$$

3. 휴리스틱 탐색전략

최선우선 탐색법은 이러한 대규모 탐색트리 구조하에서 휴리스틱을 운용목적에 가장 적합할 가능성이 높은 계통구성을 탐색하기 위한 경로선택의 안내자로 이용함으로써 최소의 탐색비용으로 준최적 또는 최적의 해를 얻을 수 있다. 따라서, 대규모 배전계통의 실시간 재어진략 수립을 위한 탐색법으로 적합하다. 그럼 3은 휴리스틱을 이용한 최선우선 탐색법을 보인다.

최선우선 탐색법은 너비우선 탐색법(breadth-first search method)을 확장한 것이다. 초기노드는 현재의 계통구성을 근거로 깊이 1의 하위노드들로 확장된다. 먼저, 너비우선 탐색법에 따라 깊이 1의 모든 노드들(명가노드들)에 대한 탐색 비용을 휴리스틱이나 간략화된 추정식에 의해서 계산한다.

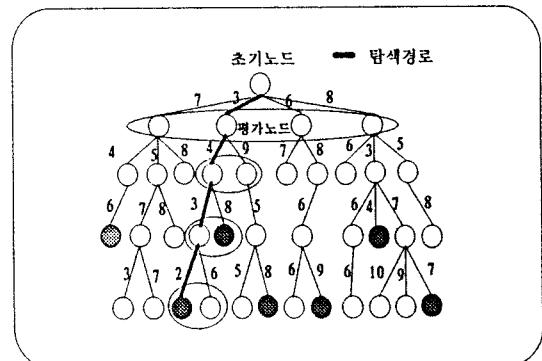


그림 3 최선우선 탐색법

3.1 허리스틱 규칙(Heuristic Rule : HR)

휴리스틱 탐색전략에서 시간제약조건을 만족하면서 보다 최적한 부하절체 전략을 수립하기 위해서는 합리적인 휴리스틱들이 채택되어야 한다.

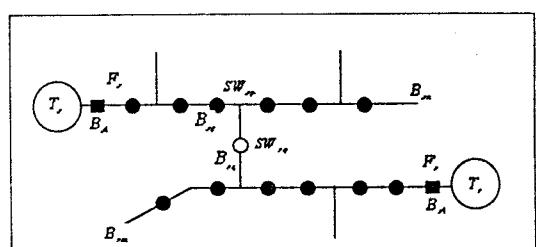


그림 4. 외 선로간 불한절체 모델

본 논문에서는 보다 정확한 탐색비용 평가를 위해 하나의 구간을 터서로로 절체했을때의 손실변화와 부하분담 규

동화 지표 변화를 휴리스틱으로 채용한다. 그림 5는 부하절체시의 지표변화를 보이기 위한 이 선로간 부하절체 모델이다. 그림에서, 연계 개폐기 SW_1 을 투입, 구분 개폐기 SW_2 를 개방하여 원으로 둘러싸인 구간을 절체 주변압기 T_1 , 배전선로 F_1 로부터 분단 주변압기 T_2 , 배전선로 F_2 로 절체되었다고 가정한다. 이때 손실변화 추정식은 식(4)와 같다.

$$\Delta P = \text{Re}\left\{2\Delta I_p(Eq - Ep)^*\right\} + |\Delta I_p|^2 R_{Loop} \quad \dots \dots \dots (4)$$

반면에, 부하분단 균등화 지표의 변화는 식 (5)로 표시된다.

$$\Delta S = -2\sigma(\Delta T_s - \Delta T_r + \Delta F_s - \Delta F_r) + 4\sigma^2 \quad \dots \dots \dots (5)$$

정전사고시 부하용통을 위한 지표변화 추정을 위해서는 식 (4),(5)에서 분단 주변압기나 배전선로의 부하분단 균등화 지표나 손실변화만이 추정된다.

[HR 1] 선로손실 최소화하에서, $\min(\Delta P)$ 의 부하절체 후보를 우선선택한다. 이 휴리스틱은 하나의 부하구간 절체시 가급적 선로손실이 최소화되는 부하절체 후보를 우선선택함으로써 부하용통 실시후 선로손실이 최소화되도록 하기 위한 것이다.

[HR 2] 부하분단 균등화 목표하에서, 동일 분단선로의 부하측 부하절체 후보가 절체후 타 분단선로의 부하절체 후보를 포함하는 경우 가장 낮은 우선순위를 가진다.

[HR 3] 부하분단 균등화 목적하에서, $\min(\Delta S)$ 의 부하절체 후보를 우선선택한다. 이 규칙은 하나의 부하구간 절체시 부하분단 균등화 지표의 변화가 최소가 되는 후보를 우선 선택함으로써 최적한 부하분단 균등화 지표를 가지는 계통구성을 얻기위한 규칙이다.

[HR 4] 개폐기 조작회수 최소화하에서 여유용량이 가장 큰 주변압기가 우선선택된다. 이 규칙은 최대 여유용량을 가지는 주변압기에 절체부하를 전답하기 위한 규칙으로써 [HR 5], [HR 6]과 연동된다..

[HR 5] 동일 주변압기의 경우 인출단에서 말단까지의 전압강하가 작은선로가 우선선택된다. 이 규칙은 가급적 경부하선로의 전원측에 존재하는 부하절체 후보를 우선선택함으로써 절체부하를 전답시키기 위한 것이다.

[HR 6] 이미 선택된 경로상에 존재하는 부하절체 후보가 우선선택된다. 이 규칙은 가급적 하나의 경로를 통해 절체부하를 전답시킴으로써 개폐기 조작회수를 최소화하기위한 규칙이다.

4. 컴퓨터 모의 결과

제안된 휴리스틱들의 유효성을 입증하기 위해 그림 5의 시험 배전계통이 도입된다. 시험 배전계통은 실 배전계통을 근거로 하며, 그 적용효과를 분명히 하기위해 수개의 선로구간들이 추가된다. 실 배전계통은 4개의 주변압기로 구성되며 각각 6,6,6,8개의 배전선로들에 전력을 공급한다. 시험 배전계통은 이를 실 배전선로들중 상이한 부하패턴을 보이는 배전선로들을 근거로 구성되는데, ○는 분기점에 표기되는 가상개폐기를 표시하며, 다크로 개폐기는 포함되지 않는다

제안된 휴리스틱들의 유용성을 입증하기 위해 25개의 서로다른 선로구간에서 정전사고가 발생하는 경우를 시험한다. 특히, 주변압기와 배전선로 부하분단 균등화, 선로손실 최소화 그리고 개폐기 조작회수 최소화등을 각 사고경우에 대해서 선택적으로 운용목적으로 취하고 이때, 일어진 실시간 계통재구성 전략들을 각 운용목적들에 최적 해와 비교함으로써 각 운용목적들간의 상관관계 해석과 실시간 해의 정도를 입증한다.

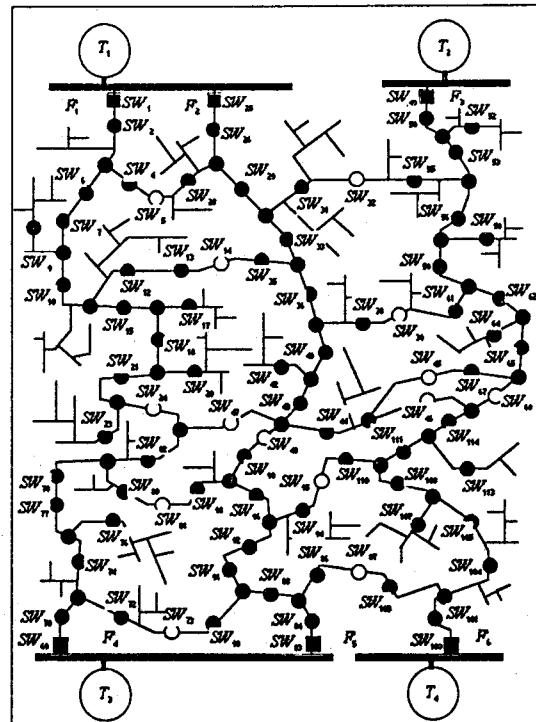


그림 5. 시험 배전계통(Test Distribution System)

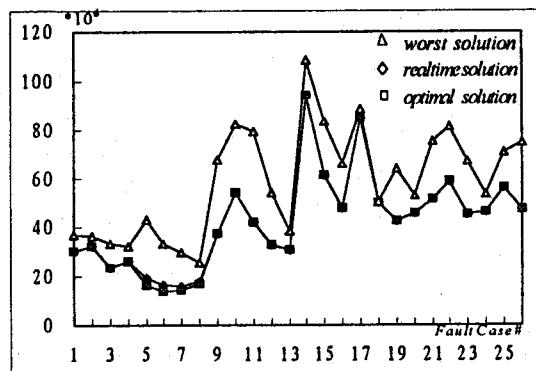


그림 6. $\min(S_{BAL})$ 하에서 고장경우들에 대한 S_{BAL}

5. 결 론

본 연구에서는 자동화된 대규모 배전계통에서 정전문제 발생시 보다 높은 최적해에 대한 수렴율을 얻기 위해 개선된 휴리스틱을 가지는 전문가 시스템을 제안하였다.

제안되는 휴리스틱들의 유효성을 입증하기 위해 시험 배전계통상의 25개의 서로다른 선로정전사고에 대해 주변압기와 배전선로 부하분단 균등화, 선로손실 최소화 그리고 개폐기 조작회수 최소화의 개별 운용목적하에서 각 운용목적들에 대한 지표값을 최악의 해, 실시간 해 그리고 최적해로 분류하여 비교 평가하였다. 평가결과는 주자자동화된 대규모 배전계통에서 정전문제 발생시 주어진 운용목적에 따라 최적한 계통재구성을 위한 실시간 제어도구로서 효과적으로 이용될 수 있음을 보인다.