

배전계통 복구능력 평가방안 및 응용

A New Evaluation Methodology of Service Restoration Capability in Distribution Systems

林 星 日* · 陳 保 建* · 李 承 宰**

(Seong-Il Lim · Bo-Gun Jin · Seung-Jae Lee)

Abstract - To secure a service continuity is one of the most important mission in the power distribution system operation. In this paper the necessary and sufficient condition to guarantee 100 % service restoration capability for any fault on the system is reported. An evaluation methodology of the restoration capability (or restorability) is developed based on the developed restoration conditions. Applications of the developed concept to the system operation in the normal and emergency states, that would enhance the supply reliability of the system are described. They include enhancement of restoration capability adapting to load change, identification of best open switch and supervised switch positions.

Key Words : Distribution System, Distribution Automation, Service Restoration, System Operation

1. 서 론

배전계통은 방사상으로 운전되기 때문에 고장이 발생되면 고장구간 부하측의 건전한 정전구간을 이윅한 연계선로로 절체하여 전력을 공급해야 한다. 이를 위해서 모든 선로는 평상시 전선의 허용전류 만큼 부하를 담당하지 않고 이윅한 선로의 고장시 정전부하를 절체받기 위한 일정량의 공급여유용량을 확보하며 운전하고 있다. 한편의 배전선로 운전용량 운영기준은 전선이 ACSR160[mm]일 때 14000[kVA]를 최대 공급용량으로 하고 고장이 발생되면 선로를 3분할하여 절체할 수 있도록 평상시 10000[kVA] 공급을 규정하고 있다. 그런데, 이러한 운영기준은 모든 선로에 동일한 공급용량을 적용하는 것이어서 개폐기에 의해 분할되는 부하량이 일정치 않거나 인근 선로의 연계위치가 적절치 않을 경우에는 고장시 정전복구가 안되는 경우가 발생할 수 있다. 이를 피하기 위하여 일선 배전사업소 운영자들은 좀더 많은 공급여유용량을 확보하여 여유있게 운전하려는 경향이 있고 이는 선로의 이용율을 낮추는 원인이 된다. 최근 배전자동화 시스템의 도입됨에 따라 개폐기에 대한 실시간 감시제어가 가능해지고 원격계측에 의해 구간별 부하량을 정확히 알 수 있는 등 배전계통 운영환경이 획기적으로 변화하고 있다. 본 논문에서는 이러한 환경변화를 활용하여, 개별 구간의 복구능력을 정량적으로 평가함으로써, 공급 신뢰도와 설비 이용율을 동시에 향상시키는 새로운 배전계통 운용전략을 제시한다.

배전선로에서 고장이 발생했을 때 정전구간을 연계선로로 절체하는 방안의 수립은 개폐기 투입/개방 상태에 대한 조합 최적화 문제로서 제한된 시간내에 준 최적해를 도출하기 위해 경험적 탐색방법을 사용하는 다양한 연구[1-3]가 진행되어 왔으며, 최근에는 배전선로 운영자의 경험적 지식을 활용하는 전문가 시스템의 적용에 대한 연구[4-6]가 수행되었다. 그러나 배전선로의 복구능력에 관해서는 선로의 분할 및 연계기준[7]이나 적정 공급용량[8]에 대한 연구만이 수행되었을 뿐 직접적으로 배전선로의 복구능력을 평가방법에 관한 연구는 찾아보기 어렵다. 현재 배전계통의 복구능력을 향상시키기 위한 방법으로는 대상선로의 부하량에 대한 연계선로의 공급여유용량의 비를 크게 하거나[9] 부하를 균등하게 배분하는 간접적인 방법을 사용하고 있다.

본 논문에서는 선로상의 어느 구간에서 고장이 발생하더라도 부하측의 모든 건전한 정전구간이 항상 100% 복구될 수 있다는 복구가능조건(Restoration Condition)을 제시하고 증명하였으며, 배전선로의 복구능력을 정량화하는 방법으로서 복구도 지수(Restoration Index)를 제안하였다. 또한 복구능력 평가기법을 실제계에 적용하기 위한 운용전략으로서 복구지수의 계산방법과 복구 불가능구간 발생시 복구능력 회복을 위한 상시연계점 변경방법을 제시하였으며, 기타 응용예로서 복구능력 평가기법이 상시연계점 최적화나 정전복구방안 도출에 어떻게 활용될 수 있는지를 기술하였다.

2. 복구능력 평가방법

본 장에서는 배전계통의 복구능력 평가방법을 설명한다. 먼저 2.1항에서는 복구지수 관련 용어인 직선경로부하(DPL), 후비연계용량(ZSC), 구간복구지수(ZRI), 선로복구지수(FRI)를

* 正 會 員 : 明知大學 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 明知大學 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2001年 11月 21日

最終完了 : 2002年 5月 27日

설명하고, 2.2항에서는 어떠한 구간에 고장이 발생하더라도 100% 복구될 수 있다는 복구조건을 제시하고 증명하였으며, 2.3항에서는 복구지수의 효율적 계산 알고리즘과 체크 포인트에 대하여 설명한다.

2.1 복구지수(Restoration Index)

2.1.1 직선경로 부하 (DPL : Direct Path Load)

어떤 구간으로부터 상시연계점까지의 직선경로상에 있는 구간부하의 합계를 '직선경로 부하(DPL)'라고 부르며, 구간 Z_i에서 연계선로 F_j까지의 직선경로부하를 DPL_{i,j}라고 표기한다. 그림 1에서 구간 Z₁에서 연계선로 F₂까지의 직선경로 부하는 'Direct Path 1'을 따라 구간 Z₁(600), Z₂(900), Z₄(800), Z₅(700)로 이루어지며 DPL_{1,2}는 3000[kVA]이 된다. 같은 방법으로 DPL_{1,3}는 Z₁(600), Z₂(900), Z₃(1100)의 합인 2600[kVA]로 계산된다.

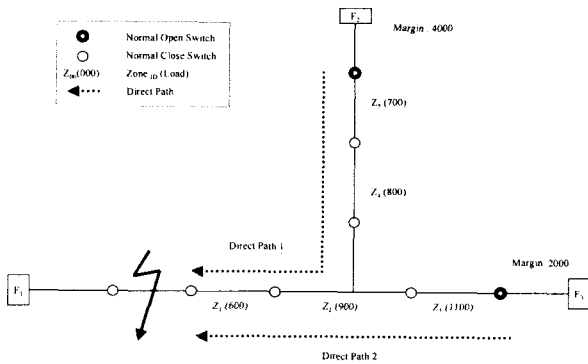


그림 1 세 개의 선로로 구성된 배전계통
Fig. 1 Three feeder distribution system

2.1.2 후비연계 용량 (ZSC : Zone Supporting Capacity)

어떤 선로가 임의의 구간에 대하여 얼마나 많은 공급여유 용량을 제공하는지를 나타내는 지수이다. 연계선로의 공급여유 용량에서 어떤 구간까지의 직선경로부하(DPL)을 뺀 값으로 정의하며 구간 Z_i에 대한 연계선로 F_j의 후비연계용량(ZSC)은 ZSC_{i,j}라고 표현한다. 그림 1에서 ZSC_{1,2}는 F₂의 공급여유 용량 4000[kVA]에서 직선경로부하인 DPL_{1,2} 3000[kVA]을 뺀 1000[kVA]가 된다. ZSC_{1,3}는 -600[kVA]으로 계산되는데, 여기서 ZSC가 음수라는 의미는 Z₁의 전원측 사고시에 구간 Z₁이 연계선로 F₃으로 절체될 수 없음을 의미한다.

2.1.3 구간 복구지수 (ZRI : Zone Restoration Index)

어떤 구간의 부하측에 연결된 연계선로 중 후비연계용량(ZSC)이 가장 큰 연계선로를 주연계선로(MBF: Main Backup Feeder)라 부르고, 주연계선로의 후비연계용량(ZSC)을 그 구간의 '구간복구지수(ZRI)'라고 정의한다. 구간 Z_i에 대한 구간 복구지수 ZRI_i는 식(1)과 같이 표현된다.

$$ZRI_i = \text{MAX}_j (ZSC_{i,j}) \tag{1}$$

구간복구지수(ZRI)의 크기는 주연계선로가 해당구간을 복구한 후 남은 여분의 공급여유용량을 나타내는 것으로 어떤 구간의 구간복구지수가 0보다 크다는 것은 그 구간의 전원측에서 사고가 발생하였을 때 최소한 그 구간은 복구될 수 있다는 의미이다. 어떤 구간의 구간복구지수가 0보다 작다면 인접한 전원측 구간 사고시 그 구간은 복구될 수 없다. 그림 1에서 구간 Z₁의 부하측 연계선로 F₂, F₃ 중에서 큰 후비연계용량(ZSC)을 공급하는 연계선로인 F₂가 주연계선로(MBF)이며 F₂의 후비연계용량(ZSC_{1,2}) 1000[kVA]가 구간 Z₁의 구간복구지수(ZRI₁)가 된다.

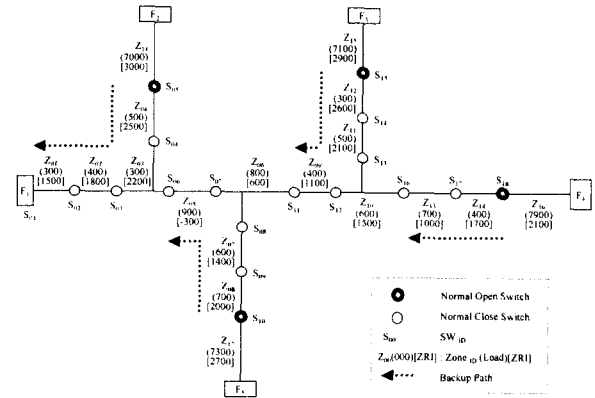


그림 2 ZRI 계산결과
Fig. 2 ZRI calculation results

2.1.4 선로 복구지수 (FRI : Feeder Restoration Index)

선로복구지수(FRI)는 구간복구지수(ZRI)를 확장한 개념으로서 선로의 복구능력을 나타내는 지수이다. 어느 하나의 구간이라도 복구능력이 부족하면 선로 전체의 복구능력이 부족한 것이므로 선로상의 모든 구간의 복구지수중 최소치로 나타내며 식(2)와 같이 표현된다.

$$FRI = \text{MIN}_k (ZRI_k) \tag{2}$$

선로복구지수가 FRI가 0보다 크면 선로상의 어느 구간에서 고장이 발생하더라도 부하측의 모든 건전한 정전구간이 복구될 수 있음을 의미하며, 0보다 작다면 정전고장 발생시 복구될 수 없는 구간이 존재함을 의미한다.

2.2 복구가능 조건

2.2.1 복구가능 조건

어떤 선로를 구성하고 있는 모든 구간의 구간복구지수(ZRI)가 0보다 크다면 그 선로는 선로상의 어느 구간에서 고장이 발생하더라도 부하측의 건전한 정전구간이 모두 복구

될 수 있다. 만약 선로상의 어느 한 구간이라도 구간복구지수(ZRI)가 0 보다 작으면 그 구간의 직상위 구간에서 고장이 발생했을 때 복구 불가능한 정전구간이 반드시 존재한다.

- A : 어떤 선로의 선로복구지수(FRI)가 0 보다 크다
- B : 선로상의 어느 구간에서 사고에 발생하더라도 부하측의 모든 정전구간이 복구 가능하다

2.2.2 필요충분 조건임을 증명

A→B 임을 증명

조건에서 선로복구지수(FRI)가 0 보다 크므로 선로상의 모든 구간복구지수(ZRI)가 0 보다 크다. 선로상의 임의의 한 구간에서 고장이 발생하였을 때 인접한 부하측 구간(Z1)에서부터 생각해 보면 그 구간(Z1)의 구간복구지수(ZRI)가 0보다 크므로 주연계선로(MBF)의 후비연계용량(ZSC)이 0보다 크고, 따라서 그 구간(Z1)으로부터 주연계선로(MBF)까지의 직선경로부하(DPL)가 복구가능하다. 복구된 직선경로부하(DPL)에서 분기된 가지에 대하여 위의 방법을 반복하여 적용하면 모든 정전구간이 복구가능하므로 A→B 는 참이다.

A→B(=B→A) 임을 증명

조건에서 선로복구지수(FRI)가 0보다 작으므로 그 선로를 구성하고 있는 구간중 적어도 하나의 구간(Z₂)은 구간복구지수(ZRI₂)가 0 보다 작다. 구간 복구지수가 0 보다 작은 구간(Z₂)의 직상위 전원측 구간에서 고장이 발생했다고 가정하면, 그 구간 부하측의 모든 연계선로의 공급여유용량이 그 구간(Z₂)까지의 직선경로부하(DPL) 보다 작다. 따라서 어떤 연계선로도 그 구간(Z₂)까지 전력을 공급할 수 없으므로 그 구간(Z₂)는 복구될 수 없고 A→B(=B→A)는 참이다.

위의 두 증명을 통하여 A와 B는 서로 필요충분 조건임을 알 수 있다.

본 논문에서 제시하는 복구능력 평가방법은 정전구간에 직접 연결되어 있는 연계선로인 '레벨1 연계선로'만을 대상으로 한다. 왜냐하면 정전복구방안으로서 레벨1 연계선로의 연계선로인 '레벨2 연계선로'를 사용하게 되면 복구 및 복구절차가 복잡해지고, 현재의 정전과는 관계없는 건전한 부하에 대한 절체가 발생하며, 건전부하절체를 위한 루프 운전시 보호기기 동작 위험성이 있기 때문이다. 물론 실제 정전상황에서는 레벨1 연계선로만을 이용한 복구방안이 존재하지 않을 경우 레벨2 연계선로 나아가 레벨3 연계선로까지도 이용하여 정전부하를 절체하려 하겠지만 본 논문과 같이 정전사고를 대비하는 능력을 평가하는 문제에서는 운영자들이 가급적 피하려고 하는 건전부하절체를 고려하지 않는 것이 타당하다.

2.3 선로복구 지수의 계산

배전선로는 평상시 방사상으로 운전되므로 트리형태의 자료구조로 나타낼수 있다. 그림 2에 나타난 배전계통에서 선로 F1은 그림 3과 같은 트리구조로 표현된다. 그림 3에서 구간은 노드, 개폐기는 가지로 표현되었으며 전력의 공급방향에

따라 부모-자식 관계가 형성되었다. 각 노드에서 구간 복구지수는 자식노드들의 구간복구 지수 중 최대치에서 두 노드를 연결하는 구간의 부하를 뺀 값으로 결정되며, 자식노드가 말단인 경우 자식노드의 구간복구지수는 해당 연계선로의 공급여유용량에서 자식노드의 구간부하를 뺀 값으로 결정한다.

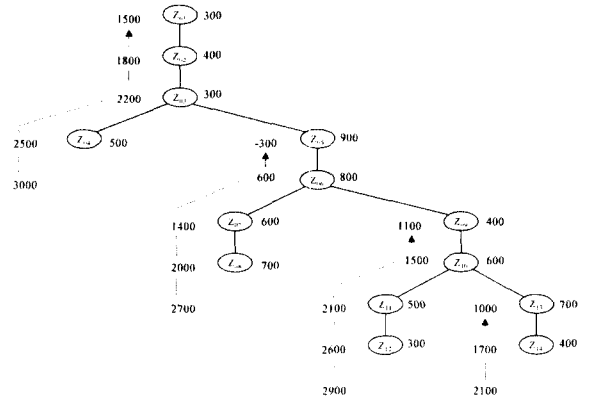


그림 3 ZRI를 계산하기 위한 트리구조
Fig. 3 Tree structure for calculating ZRI

위의 알고리즘을 말단에서 전원측으로 반복 적용하면 모든 노드의 구간 복구지수가 계산된다. 다음은 구간 복구지수를 계산하기 위한 재귀함수의 요약이다.

```

Calculate_ZRI(node)
IF node is leaf
    node.ZRI = connected_BF_margin - node.load
ELSE
    FOR all child_node
        Calculate_ZRI(child_node)
    END FOR
    node.ZRI = max(child_node.ZRI) - node.load
END IF
    
```

위의 알고리즘에서 보는바와 같이 구간복구지수의 계산방법은 매우 간단하며 연산 부담이 거의 없어 최적화문제와 같이 반복계산이 요구되는 응용분야에서도 실용적으로 사용될 수 있다.

2.4 선로 복구지수 체크포인트

그림 3은 구간을 노드로 하는 배전선로의 트리구조와 각 노드의 구간별 부하 및 구간복구지수 계산결과를 나타낸다. 화살표로 나타낸 점선은 주연계선로가 같은 구간들을 연결한 것으로 구간복구지수의 계산경로이다. 화살표상의 각 경로에 대하여 전원측 구간 복구지수는 항상 부하 측 구간 복구지수보다 작으므로 구간 복구지수(ZRI)의 최소치는 화살표로 나타낸 복구경로의 끝점에 위치한다. 따라서 선로의 복구능력을 나타내는 선로 복구지수를 결정하기 위해선 복구경로 화살표에서 전원측 마지막 구간의 복구지수 중 최소치만을 체크하면 된다. 즉 모든 구간의 구간 복구지수를 검사하는 대

신 Z01, Z05, Z09, Z13의 최소치만을 검사하면 선로 복구지수를 알 수 있다. 그림 3에서 선로복구지수는 1500[kVA], -300[kVA], 1100[kVA], 1000 [kVA]의 최소치인 -300[kVA]으로 쉽게 결정된다. 앞서 설명한바와 같이 선로복구지수(FRI)는 매우 중요한 의미를 가지는데 0보다 크면 선로상의 어느구간에서 고장이 발생하더라도 부하측의 건전한 정전구간이 모두 복구 가능하고 제시된 예와 같이 0보다 작은 경우는 복구가 불가능함을 나타낸다. 그림 3의 계통에서 Z03에서 고장이 발생한 경우 건전부하절체를 사용하지 않고는 Z05를 복구할 수 있는 어떠한 방법도 찾을수 없음을 알 수 있다.

3. 복구능력 개선방법

배전선로의 복구능력을 평가하여 구간복구지수(ZRI)가 0보다 작은 구간이 있으면 고장 발생시 복구가 불가능한 구간이 있는 것이므로 상시개방점을 변경하여 선로의 공급여유용량을 적절히 재조정함으로써 복구능력 부족을 해소하여야 한다. 복구능력 회복을 위한 부하절체 방안은 후보탐색과 퍼지평가라는 두 단계를 거쳐 도출된다. 후보탐색 단계에서는 선로용량, 전압강하, 복구지수 등 기본적인 제약조건을 만족하는 실행 가능한 부하절체 방안 후보들을 탐색하고, 퍼지평가 단계에서는 절체부하량, 손실, 부하균등화 등을 종합적으로 평가하여 최선의 해를 도출한다.

3.1 후보 탐색 단계

구간 Zi의 구간복구지수 ZRIi가 0보다 작을 때 이를 개선하려면 부하측 연계선로 Fj가 부하 일부를 제 3의 선로로 절체하여 직선경로부하 DPLij 보다 큰 공급여유용량을 확보하여야 한다. 부하절체 방안은 다음의 제약조건들을 만족하여야 한다.

선로허용용량

부하를 절체받은 선로의 총부하가 선로의 허용용량보다 작아야 한다.

말단전압강하

부하를 절체받은 선로의 말단 전압강하가 허용치보다 작아야 한다.

구간복구지수

부하를 절체받은 선로의 공급여유용량이 감소함으로 인하여 인근 선로의 복구능력 부족이 발생하지 않아야 한다.

그림 4에서 구간 Z1의 ZRI가 0보다 작아 복구능력 부족이 발생한 것은 선로 F6과 선로 F3의 공급여유용량이 각각 DPL1,6와 DPL1,3보다 작기 때문이다. 이를 해소하려면 공급여유용량의 부족분 만큼 선로 F6 혹은 F7의 부하가 이웃선로로 절체되도록 상시개방점을 변경하여야 한다. 하나의 부하절체 방안 후보에서 새로 선정되는 상시개방점은 절체되는 부하량이 공급여유용량 부족분보다 크면서 가까운 개폐기로 결정된다. 즉, 그림 4에서 선로 F3와 선로 F2간의 부하절체에서 상시개방점 S4를 S1, S2, S3중 하나로 이동해야 하는데 절체되

는 부하량 Z5가 F3의 공급여유용량 부족분보다 크면서 가장 가까운 S2로 결정된다. 선로 F6의 부하 Z2를 선로 F7으로 절체하는 방안, 선로 F3의 부하 Z4를 선로 F4로 이동하는 방안 등이 각각 복구능력 개선을 위한 부하절체 방안 후보가 된다. 그런데 선로 F6에서 F5로 부하를 절체하는 경우와 같이 필요한 절체부하량 Z3가 너무 커서 선로 F6과 선로 F5의 분기점을 넘어가는 경우는 선로 F1의 연계선로가 선로 F6에서 선로 F5로 변경되므로 후보2는 제외된다.

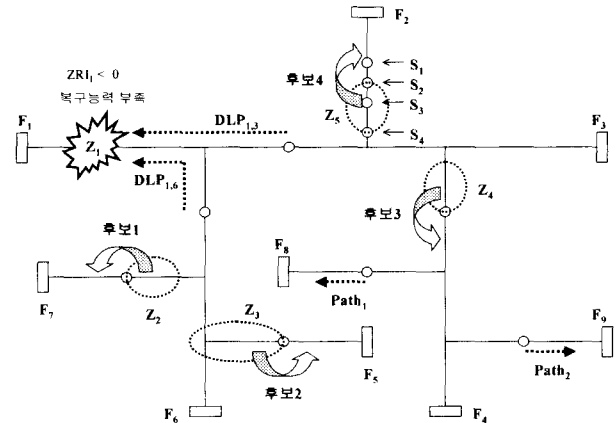


그림 4 예제 배전계통 1
Fig. 4 Example distribution system 1

다음은 후보 1, 3, 4를 대상으로 선로허용전류, 말단전압강하, 구간복구지수에 대한 제약조건을 만족하는지 검사한다. 앞의 두 조건은 일반적인 제약조건으로서 부하를 절체받은 선로의 최대부하와 최대 전압강하가 정해진 기준치를 만족하는지 검사한다. 구간복구지수 제약조건은 후보 3에서 선로 F3가 공급여유용량을 추가 확보하기 위하여 부하 Z4를 선로 F4로 절체하면 선로 F4의 공급여유용량이 감소하는데 이로 인하여 선로 F4의 연계선로인 선로 F8이나 선로 F9에 복구능력 부족이 발생하지 않는지를 검사하는 것이다. 선로 F4가 선로 F8과 선로 F9에게 주연계선로로서 공급하는 후비연계용량의 최소치가 절체받은 부하량보다 큰 경우 만족된다.

3.2 퍼지 평가 단계

실행 가능한 후보스위치 중에서 최선의 해를 선택하기 위해 절체부하량, 선로손실, 부하균등화의 세가지 기준이 적용된다. 각각의 기준은 해당되는 퍼지룰을 이용하여 평가되며 퍼지평가 결과는 가중치합계를 통하여 종합된다. 퍼지룰의 평가는 최대-최소법을 이용하여 합성되고 무게중심법을 이용하여 비퍼지화 된다.

3.2.1 부하절체 최소화

임의의 시점에서 배전계통은 최적화되어 있다고 볼 수 있으므로 선로구성 변경을 최소화하는 것이 바람직하다. 개폐기는 부하량을 이산적으로 분할하므로 정확히 원하는 크기의 부하를 절체할 수는 없다. 따라서 절체되는 부하가 필요한

양보다는 크면서 최소화되는 개폐기가 선택되어야 한다. 부하절체 최소화를 평가하기 위한 퍼지룰은 다음과 같으며 여기서 TLA(Total Load Amount)는 절체되는 부하량의 크기를 나타낸다.

if TLA is Small then Plan is Very Good
 if TLA is Medium then Plan is Good
 if TLA is Big then Plan is Poor

3.2.2 부하균등화

부하균등화는 복구능력, 선로손실 및 전압강하와 매우 밀접하게 관련되어 있어 배전계통 운영에서 매우 중요하다. 부하 재분배에서도 부하균등화를 고려하지 않으면 경부하 선로의 부하가 중부하 선로로 절체되어 부하 불평형이 심화되고 선로 이용율이 감소되는 결과를 초래한다. 아래에 제시된 부하균등화 평가 퍼지룰은 경부하 선로로 부하가 절체되는 후보가 높은 점수를 획득하도록 구성되어 있다. 퍼지변수 LA(Load Amount)에는 부하를 절체받은 선로의 부하량을 내입한다.

if LA is Small then Plan is Very Good
 if LA is Medium then Plan is Good
 if LA is Big then Plan is Very Poor

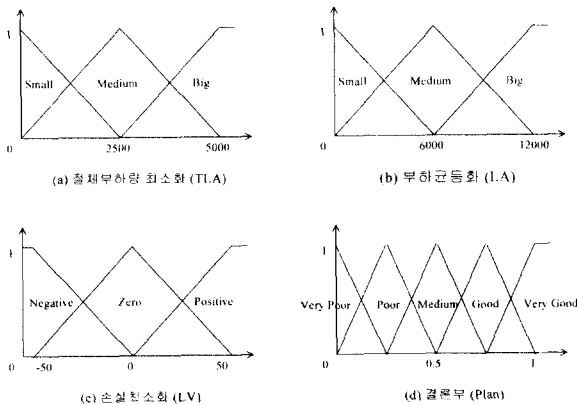


그림 5 평가기준의 멤버십 평선
 Fig. 5 Membership functions of evaluation criteria

3.2.3 손실최소화

배전자동화 시스템 환경에서는 각 개폐기에서 실시간 전류를 측정하여 실용적인 손실 계산이 가능하므로 향후 배전계통 운영에서 선로손실이 매우 중요하게 다루어질 것으로 예상된다. 따라서 실행 가능한 부하절체 방안 중에서 손실이 최소로 되는 후보가 좋은 평가를 받아야 한다. 선로 손실을 평가하기 위한 다음의 퍼지룰에서 LV(Loss Variation)는 부하절체 전후의 손실 변화량을 나타낸다.

if LV is Negative then Plan is Very Good
 if LV is Zero then Plan is Medium
 if LV is Positive then Plan is Very Poor

절체부하량 최소화, 부하균등화, 손실 최소화 등 조건부의 퍼지변수에 대한 멤버십평선은 각각 그림 5의 (a), (b), (c)와 같으며, 그림 5의 (d)는 결론부 멤버십평선을 나타낸다.

3.3 사례연구

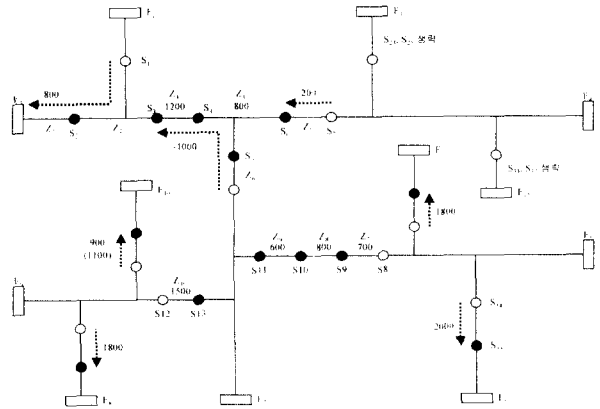


그림 6 예제 배전계통 2
 Fig. 6 Example distribution system 2

3.3.1 복구능력 평가

그림 6에서 점선 화살표는 주연계선로(MBF)의 공급경로로서 선로 F2는 선로 F1 사고에 대하여 구간 Z2, Z1을 담당하고 800[kVA]의 추가 공급여유용량이 있으며, 선로 F7은 선로 F1 사고시 자신이 주연계선로(MBF)인 구간 Z6, Z4, Z3을 공급하기에는 1000[kVA]의 공급여유용량이 부족함을 나타내고 있다. 즉, 선로 F1의 복구지수 체크포인트인 Z1, Z3, Z5에서 구간복구지수(ZRI)는 각각 800[kVA], -1000[kVA], 200[kVA] 이므로 구간 Z3에서 복구능력 부족이 발생하여 구간 Z2에서 고장이 발생했을 때 구간 Z3이 복구될 수 없음을 알 수 있다. 표 1은 선로 F1의 복구능력 평가결과를 나타내고 있다.

표 1 선로 F1의 복구능력 평가 결과
 Table 1 Evaluation results of restoration capability of feeder F1

선로명	체크포인트	MBF	ZRI	평가결과
F1	Z1	F2	800	-
F1	Z3	F7	-1000	부족
F1	Z5	F4	200	-

3.3.2 복구능력 개선방안 후보탐색

구간 Z3의 복구능력 부족을 해소하기 위해선 선로 F7이 1000[kVA]의 공급여유용량을 추가 확보하거나 연계선로 F4가 1800(1200+800-200)[kVA]의 공급여유용량을 추가 확보해야 하므로 모든 연계선로에 대하여 실행가능한 부하절체 방안을 탐색한다. F7이 공급여유용량을 추가 확보하는 방법은 현재 개폐기 S12 인 상시개방점을 개폐기 S13으로 이동하여

구간 Z₁₀의 부하 1500[kVA]를 선로 F₉로 절체하는 방법과 현재 개폐기 S₈인 상시개방점을 개폐기 S₁₀으로 이동하여 구간 Z₇, Z₈의 부하 1500[kVA]를 선로 F₅로 절체하는 방법이 있다. 그런데 구간 Z₁₀의 부하 1500[kVA]를 선로 F₉로 절체하게 되면 F₉의 공급여유용량이 1500[kVA] 만큼 감소하여 선로 F₁₀에게 제공하는 후비연계용량(ZSC)이 -400[kVA]으로 감소하여 선로 F₁₀에 복구능력 부족이 발생하게 되므로 복구능력 개선방안에서 제외된다. 그러나 구간 Z₇, Z₈의 부하 1500[kVA]는 선로 F₅로 절체된다라도 선로 F₅가 인근 연계선로에 제공하는 후비연계용량(ZSC)은 1800[kVA], 2000[kVA]이므로 부하절체 후에도 선로 F₁₁, F₆에 복구능력 부족이 발생되지 않는다. 따라서 상시연계점을 개폐기 S₈에서 개폐기 S₁₀으로 이동하는 것은 구간 Z₃에 발생된 복구능력을 해소하기 위한 실행 가능한 부하절체 방안후보로 등록된다. 같은 방법으로 보조연계선로 F₄에 대하여서도 F₃와 F₁₂에 대한 실행 가능한 부하절체 방안 후보를 탐색한다. 표2는 구간 Z₃의 복구능력 개선방안의 후보탐색 결과를 나타내고 있다.

표 2 복구능력 개선방안 후보탐색 결과
Table 2 Candidates to enhance restoration capability

후보	1	2	3	4
From 선로	F ₇	F ₇	F ₄	F ₄
To 선로	F ₅	F ₉	F ₃	F ₁₂
현재 연계점	S ₈	S ₁₂	S ₂₃	S ₃₃
새 연계점	S ₁₀	S ₁₃	S ₂₅	S ₃₇
선로허용용량	만족	만족	만족	만족
말단전압강하	만족	만족	만족	만족
구간복구지수	만족	불만족	만족	만족

3.3.3 복구능력 개선방안 퍼지평가

위와 같은 과정을 거쳐 실행 가능한 복구능력 개선방안 후보들이 탐색되면 부하절체 최소화, 부하균등화, 손실최소화의 관점에서 종합적으로 평가하여 최선의 후보를 선택한다. 최

표 3 퍼지평가 결과
Table 3 Fuzzy evaluation results

후보번호	1	3	4
데이터			
절체 부하량	1500	5500	3700
퍼지평가	0.76	0.25	0.51
최대 부하량	9800	10500	9000
퍼지평가	0.47	0.40	0.52
손실 변화량	+5	-7	+3
퍼지평가	0.47	0.54	0.48
최종선호도	0.59	0.37	0.50
우선순위(Ranking)	1	3	2

선의 부하절체 방안으로는 표 3에 나타난 퍼지평가 결과에서 보는바와 같이 최종선호도 0.59 인 1번 후보가 선정된다. 즉, ZR₃ -1000[kVA]를 해소하기 위해서 개폐기 S₈을 투입하고 개폐기 S₁₀을 개방하여 구간 Z₇, Z₈의 부하 1500[kVA]를 선로 F₇로부터 선로 F₅로 절체함으로써 ZR₃를 -1000[kVA]에서 +500[kVA]로 개선하여 고장 발생시 복구가능하도록 대비한다.

4. 기타 응용 분야

4.1 정전복구 방안수립

방사상 배전계통에서 고장이 발생하면 고장구간 부하측의 건전한 정전구간을 이웃한 연계선로로 절체하여 신속히 전력공급을 재개하여야 한다. 정전구간에 대한 복구계획은 전력회사에 따라 다양한 방법으로 수립된다. 저자들은 참고문헌 [9]에서 매우 실용적인 정전복구방안 도출방법을 제시하였다. 이 방법은 실행가능한 복구방안 후보들을 여러가지 기준에서 종합적으로 평가하여 최적의 해를 도출한다. 고려되는 평가 기준은 스위칭수 최소화, 부하균등화, 건전부하절체 최소화, 비상대비도 등이다. 고려사항들 중에서 앞의 두가지는 정전 복구방안 도출에서 일반적으로 사용되는 항목이지만 뒤의 두가지는 당시의 연구에서 새롭게 제안된 평가기준이다. 특히 마지막 평가기준인 비상대비도는 기존의 어느 연구에서도 언급된 적이 없지만 고장 발생시 복구가능여부를 나타내는 항목이기 때문에 배전선로 운영에서 가장 중요하게 다루어져야 한다. 비상대비도는 연계선로의 개수와 부하량에 대한 공급여유용량의 비로 계산하였는데 이것만으로는 선로의 복구능력을 완벽하게 평가하기는 어려웠다.

본 논문에서는 정전복구 방안도출 문제에서 복구능력을 좀 더 정확하게 평가하기 위하여 비상대비도 항목을 선로복구지수(FRI)로 대체하려고 한다. 앞서 설명한 바와 같이 선택된 복구방안을 수행하더라도 관련된 모든 선로의 복구지수가 양의 값을 유지하면 모든 구간은 어떠한 2차고장에 대해서도 복구가능하다는 것을 보장할 수 있다.

4.2 상시개방점 최적화

다중연계방식의 방사상 배전계통에서 상시개방점을 결정하는 문제는 탐색공간이 매우 큰 조합최적화 문제로서 분지한 계법, 분기교환법, 시플레이트드어널링, 전문가시스템, 타부썬치, 유전알고리즘등 다양한 기법들이 제안되었다. 그러나 이들 탐색방법은 대부분은 손실최소화나 부하균등화를 목적함수로 하므로 배전선로의 운영에서 가장 중요한 복구능력을 직접적으로 고려하고 있지는 못하다.

본 논문에서는 상시개방점을 선택하는 문제에서 복구능력을 고려하기 위하여 식 (3)과 같은 목적함수를 제시한다. 식 (3)에서 둘, 셋, 네번째 항목인 전압강하, 선로용량, 복구능력은 제약조건으로서 정해진 기준값을 만족하면 1 그렇지 않으면 0의 값을 가지게 하고 상대적으로 큰 가중치를 부여함으로써 기본적인 운전제약조건이 만족된 상태에서 첫 번째 항

목인 선로손실이 최소화 되도록 한다. 복구능력을 나타내는 네 번째 항목 RC는 $RC = \frac{MIN}{i} (ZRI_i)$ 로 계산되며 1 아니면 0의 값을 가진다. 이는 선로의 복구능력을 정량적으로 평가 하므로서 배전선로가 임의의 구간 고장에 대하여 복구가능한 지 아닌지를 명확히 구분할 수 있음을 나타낸다.

$$F = a_1 F_1(P_L) + a_2 F_2(V_D) + a_3 F_3(S_{kVA}) + a_4 F_4(RC) \quad (3)$$

식에서,

P_L : 각 DL별 선로손실의 합계

V_D : 전압강하의 최대치

S_{kVA} : DL부하량의 최대치

RC : 선로 복구지수의 최소치

a_1, a_2, a_3, a_4 : 항목별 중요도를 나타내는 가중치

5. 결 론

방사상 배전계통에서 고장이 발생되면 고장구간 부하측의 건전한 정전구간을 이웃한 연계선로로 절체하여 신속히 전력 공급을 재개하여야 한다. 이를 위하여 모든 선로는 일정량의 공급여유용량을 확보하며 운전하고 있는데 이는 설비 이용율, 공급 신뢰도와 직접적인 관련이 있다. 현재는 모든 배전선로에 동일한 공급용량을 정하여 운전하고 있는데 배전자동화 시스템의 도입으로 배전계통 운영환경이 급격히 변화하고 있으므로 이에 적합한 새로운 운전기준과 적용방법이 요구되고 있다.

본 논문에서는 배전선로의 복구능력을 평가하기 위하여 '복구가능조건'을 제시하였으며 이것이 '선로상의 어느 구간에서 고장이 발생하더라도 부하측의 건전한 정전구간이 항상 100% 복구될 수 있다'는 것을 필요충분 조건임을 증명하였다. 또한 배전선로의 복구능력을 정량적으로 평가하기 위한 방법으로서 복구도 지수를 제안하였고, 평가결과 복구능력 부족이 발생했을 때 이를 해소하기 위한 부하절체 방안을 제시하였다.

이밖에도 본 논문에서 제안하는 복구능력 평가방법의 활용 예로서 2차사고에 대비할 수 있는 정전복구계획 수립방법과 복구능력을 고려한 상시개방점 최적화 방법을 제시하였다. 제안된 복구능력 평가기법은 연산량이 적고 실용적이므로 다양한 실계통 운영 소프트웨어에 적용된다면 배전계통의 신뢰도와 이용율을 향상시키는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 과학재단의 ERC 프로그램 을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] K. Aoki, K. Nara, M. Itoh, T. Satch, and H. Kuwabara, "A New Algorithm for Service Restoration in Distribution Systems", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 4, No. 3, July 1989
- [2] A. L. Morelato and A. Monticelli, "Heuristic Search Approach to Distribution", Paper 89 WM 111-6 PWRD, Presented at the IEEE/PES 1989 Winter Meeting.
- [3] V. Susheela Devi, D. P. Sen Gupta and G. Anandalingam, "Optimal Restoration of Power Supply in Large Distribution Systems in Developing Countries", IEEE Tr. Power Delivery, Vol. 10, No. 1, pp. 430-438, January 1995.
- [4] C. C. Liu, S. J. Lee and S. S. Venkata, "An Expert System Operational Aid for Restoration and Loss Reduction of Distribution Systems", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 3, No. 2, May 1988.
- [5] C. C. Liu, M. S. Tsai, V. N. Mesa and R. Hartwell, "Alleviation of Abnormal Feeder Operating Condition with a Real Time Expert System Environment", 3rd Symposium on Expert System Application to Power Systems, April 1991.
- [6] S. J. Lee, J. Y. Yoon, T. H. Kim, K. H. Kim, H. Y. Kim and H. M. Kim, "Operational Planner with General Switching Sequencer in Das Control Center", Intelligent System Application to Power Systems, pp. 273-278, 1994
- [7] 한국전력공사 기술연구원, "대용량 배전에 관한 연구 (최종보고서)", 한국전력공사, 1991. 3.
- [8] 한국전력공사 기술연구원, "22.9kV-Y 배전선로 적정운전용량 기준선정에 관한 연구(최종보고서)", 한국전력공사, 1994. 10
- [9] S.J. Lee, S.I. Lim and B.S. Ahn, "Service Restoration of Primary Distribution Systems Based on Fuzzy Evaluation of Multi-Criteria", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 13, No. 3, pp. 1156-1163, August 1998.

저 자 소 개



임 성 일 (林 星 日)

1967년 7월 10일 생.
1994년 명지대 공대 전기공학과 졸업.
1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1996년~2002년 대전 전력연구원.
현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
Tel : 031-335-2068
Fax : 031-330-6816,
E-Mail : lim7610@hotmail.com



진 보 건 (陳 保 健)

1976년 9월 28일 생.
2000년 명지대 공대 전기전자공학부 졸업.
2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
Tel : 031-335-2068
Fax : 031-330-6816
E-Mail : sinato@mju.ac.kr



이 승 재 (李 承 宰)

1955년 11월 30일 생.
1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업.
1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1988년 Univ. of Washington 전기공학과 졸업(공박).
1994년 Univ.of Washington 교환교수.
현재 명지대 공대 전기정보제어공학부 교수.
차세대 전력기술연구센터 센터장.
Tel : 031-330-6362 / Fax : 031-330-6816
E-Mail : sjlee@mju.ac.kr