1999년도 대한전기학회 정기총회 및 추계학술대회 논문집 1999. 11. 20

배전계통의 복구능력 평가방법

임성일, 하복남, 이중호, 조남훈
한전 전력연구원

이승재
명지대학교

Evaluation of Restoration Capability in Radial Primary Distribution System

Seong-Il Lim, Bok-Nam Ha, Jung-Ho Lee, Nam-Hun Cho
Korea Electric Power Research Institute

Seong-Jae Lee
Myong-ji Univ.

Abstract - One of the main jobs of the operators is to make it sure to have a service continuity in a fault situation. This paper proposes a restoration index which indicates the restoration capability of the feeder in case of a fault. A necessary and sufficient condition for a feeder to have 100% restoration of the outage is also described.

1. 서 론

배전계통 운영에 있어서 사고가 발생했을 때 정전구간을 연계선로로 절체하여 신속히 전력공급을 재개하는 것은 매우 중요한 일이다. 특고압 배전계통은 다중연계된 상태에서 방사상으로 운전하고 있으며 신뢰성 있는 전력공급을 위하여 보호계전기, 부하분할 스위치, 타이스위치를 운용하고 있다. 과전류 계전기나 리클로우저 같은 보호기기는 고장을 검출하고 선로를 차단하여 고장의 파급을 방지하며, 부하분할 스위치는 고장구간과 건전구간을 분리하고, 타이스위치는 고장구간 부하 측의 건전한 정전구간을 연계선로로 절체하기 위하여 사용된다. 정전복구방안을 도출하는 과정에는 운영자의 경험적 지식이 중요한 역할을 하여 정전복구 문제를 다루는 대부분의 연구는 경험적 탐색방법이나 전문가시스템을 적용하고 있다[1,2,3,4]. 여러 가지 사용 가능한 복구방법들 중에서 최선의 해를 선택하는 기준으로는 주로 개폐기 조작횟수, 연계선로의 공급여유용량, 선로간의 부하 분담 균등화, 복구된 계통의 또 다른 사고에 대비한 복구능력 등이 사용된다.

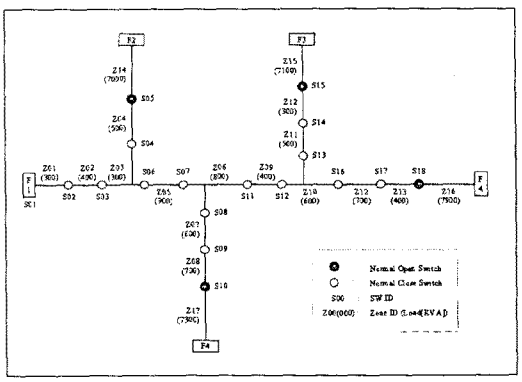
저자는 배전운영자들과의 많은 토론을 통하여 배전자동화 시스템의 정전복구방안을 도출하는 과정이 매우 빠르고 자동적으로 처리되기는 하지만 '어떻게', '왜' 그 복구방안이 도출되었는지를 금방 이해하기 어려워 불편해 한다는 것을 알게 되었다. 배전운영자들은 정전구간이 발생했을 때 간단하고 쉬운 방법으로 복구할 수 있도록 적절히 계통을 분할하고 연계하여 운영하고 있다. 따라서 배전자동화 시스템에서도 배전계통을 다양한 비상사태에 잘 대비할 수 있도록 유지하는 개념이 매우 중요하다. 저자들은 이러한 관점을 반영하여 정전복구방안 도출할 때 최선의 복구방안을 선택하는 기준으로서 비상대비도(Contingency Preparedness)라고 부르는 새로운 평가기준을 제시한바 있다. 비상대비도는 현재의 계통구성상태서 사고가 발생했을 때 정전구역이 얼마나 잘 복구될 것인가를 나타내는 지수로서 선로의 복구능력이라 할 수 있다. 비상대비도는 선로의 부하량에 대한 연계선로 공급여유용량 총합계의 비율과 연계선로의 개수를 이용하여 계산하였다. 그런데 이 지수는 연계선로의 연결위치와 구간별 부하량을 고려하지 못하였기 때문에 선로의 복구능력을 대략적으로 평가할 수 있는 있지만 지수가 높다고 해서 모든 사고에 대하여 정전구간을 100% 복구할 수 있다는 것을 보증하지는 못하였다.

본 논문에서는 선로상의 어느 구간에서 사고가 발생하더라도 모든 정전구간이 복구될 수 있는지 아닌지를 판단하는 확실하면서도 간단한 평가기준을 제시한다. 제안된 방법은 현재의 계통구성의 복구능력을 평가하는 것뿐만 아니라 복구능력이 잘 갖추어진 최적의 계통구성을 탐색하는데도 사용될 수 있다.

2. 본 론

2.1 복구능력의 평가

정전구간을 복구하기 위해선 대부분 정전구간에 직접 연결된 연계선로인 레벨1연계선로만을 사용한다. 레벨1 연계선로의 공급여유용량이 부족한 경우 건전부하 절체를 통하여 공급여유용량을 추가확보하기 위하여 가끔 레벨1 연계선로의 연계선로인 레벨2연계선로를 사용하기도 하지만 일반적인 경우는 아니다. 또 앞서 설명한 바와 같이 배전운영자들은 정전복구 방안이 레벨1연계선로로만 구성되는 것이 레벨2연계선로를 사용하여 건전부하 절체를 포함하는 방안보다 간단하기 때문에 선호한다. 본 논문에서는 배전선로에 정전이 발생했을 때 연계선로를 이용하여 정전구간이 복구될 수 있는 조건을 제시하고 그것을 증명하였으며, 배전계통의 구간별/선로별 복구능력을 평가하기 위한 복구지수들을 그 계산 알고리즘과 함께 제시한다.



〈그림 1〉 전형적인 수지상 배전계통

2.1.1 복구가능 조건

배전선로상의 어느 구간에서 고장이 발생하더라도 고장구간 부하 측의 모든 건전한 정전구간이 레벨1연계선로만을 사용하여 100% 복구될 수 있는 필요충분조건을 제시한다.

<u>복구가능 조건</u>

만약 모든 구간에 대하여 부하 측에 그 구간으로부터 연계 개폐기까지 직선경로상의 부하보다 큰 공급여유용량을 가진 연계선로가 있다면 그 배전선로는 선로 상의

어느 구간에서 고장이 발생하더라도 모든 정전구간이 부하절체를 통하여 정전복구가 가능하다.

필요충분 조건임을 증명

(A→B) 선로상의 임의의 한 구간에서 고장이 발생하였다고 하면, 조건으로부터 타이스위치에서 고장구간까지 직선경로상의 정전부하보다 큰 공급여유용량을 가진 연계선로가 고장구간의 부하 측에 적어도 하나는 존재한다. 직선경로상의 부하를 해당 연계선로로 절체하고 그 직선경로 상에서 분기된 가지선로의 첫 번째 구간을 중심으로 생각해보면, 조건으로부터 부하 측에 직선경로상의 부하를 담당할 수 있는 연계선로가 적어도 하나는 존재한다. 이런 방법을 모든 분기선로에 대해 반복적으로 적용하면 선로상의 임의의 한 구간에 발생한 사고에 대하여 부하 측의 모든 정전구간이 복구된다.

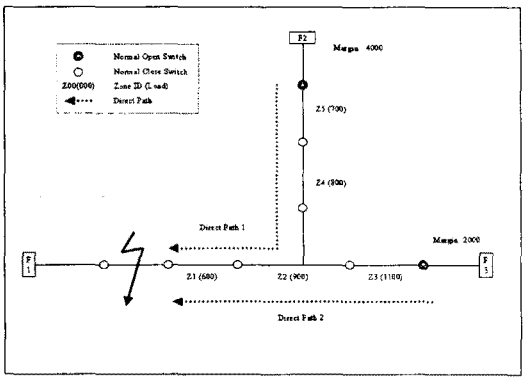
($\overline{A} \rightarrow \overline{B}$) 선로상의 어느 구간이 부하 측에 직선경로상의 부하를 담당할 수 있는 연계선로가 하나도 없다면 그 구간에 바로 인접한 전원측 구간에서 사고가 발생했을 때 그 구간은 복구될 수 없다.

2.1.2 복구 지수

먼저 복구지수에 대한 설명을 용이하게 하기 위하여 직선경로부하와 후비연계 용량이라는 용어를 정의하고, 뒤이어 배전선로의 복구능력을 정량화하기 위한 방법으로서 연계선로의 공급여유용량이 정전구간을 복구하는데 얼마나 효과적으로 사용될 수 있는가를 나타내는 구간 및 선로에 대한 복구지수를 소개한다.

직선경로 부하 (DPL:Direct Path Load)

어떤 구간으로부터 연계선로 타이스위치까지의 직선경로상에 있는 구간부하의 합계를 직선경로부하(DPL)라 부르며, 구간 Z_i에서 연계선로 F_j까지의 직선경로부하를 $DPL_{i,j}$라고 나타낸다. 〈그림 1〉에서 구간 Z_1에서 연계선로 F_2까지의 직선경로부하는 구간은 Z_1, Z_2, Z_4, Z_5로 이루어지며 $DPL_{1,2}$는 3000[kVA]이다.



〈그림 2〉 세 개의 선로로 구성된 배전계통

후비연계 용량(ZSC:Zone Supporting Capacity)

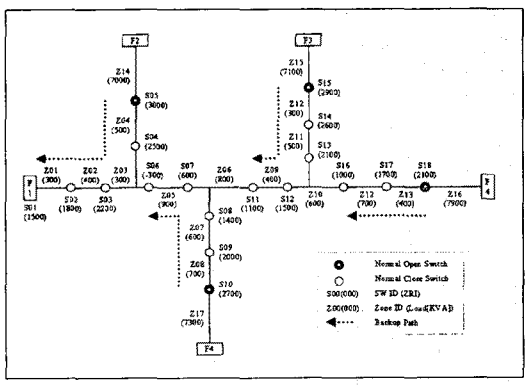
하나의 선로가 어떤 구간에 대하여 연계선로로서 얼마나 많은 공급여유용량을 제공할 수 있는가를 나타내는 지수이다. 연계선로의 공급여유용량에서 어떤 구간까지의 직선경로부하(DPL)을 뺀값으로 정의하며 구간 Z_i에 대한 연계선로 F_j의 후비연계용량(ZSC)는 ZSC_{ij}라고 표현한다. 〈그림 2〉에서 $ZSC_{1,2}$는 F_2의 공급여유용량 4000[kVA]에서 직선경로부하인 $DPL_{1,2}$ 3000[kVA](700+800+900+600)을 뺀 1000[kVA]가 된다. 같은 방법으로 계산하면 $ZSC_{1,3}$는 -600[kVA]이다.

구간 복구지수 (ZRI:Zone Restoration Index)

구간복구지수(ZRI)는 어떤 구간이 전원측 사고로 인하여 정전되었을 때 부하측의 연계선로가 이를 복구할 수 있는 충분한 공급여유용량을 가지고 있는지를 나타낸다. 부하측의 연계선로중 후비연계용량(ZSC)이 가장 큰 연계선로를 주연계선로라 부르고, 어떤 구간의 구간복구지수는 주연계선로의 후비연계용량으로 나타낸다. 구간 Z_i에 대한 구간복구지수 ZRI_i는 식(1)과 같이 표현된다.

$$ZRI_i = \underset{i}{MAX}\,(ZSC_{ij}) \quad \cdots\cdots (1)$$

구간복구지수(ZRI)의 크기는 주연계선로가 해당구간을 복구한 후 여분의 공급여유용량을 나타내므로 어떤 구간의 구간복구지수가 0보다 크다는 것은 그 구간의 전원측에서 사고가 발생했을 때 그 구간을 복구할 수 있는 레벨1 연계선로가 있다는 의미이다. 구간복구지수가 0보다 작다면 정전이 발생했을 때 부하 측에 그 구간을 복구할 수 있는 공급여유용량을 가진 연계선로가 없다. 예를들어 〈그림 3〉에서 Z_1에 대한 구간복구지수가 1000[kVA]이므로 주연계선로인 F_2가 Z_1의 부하를 담당하고도 1000[kVA]의 공급여유용량이 남아 있다.



〈그림 3〉 ZRI 계산결과

선로 복구지수 (FRI:Feeder Restoration Index)

선로복구지수(FRI)는 배전선로를 구성하는 여러 구간 중 어느 구간에서 사고가 발생하더라도 사고구간 부하측의 모든 정전구역이 복구될 수 있는지를 나타내는 지수이다. 본 논문에서는 선로의 복구능력을 나타내는 지수를 그 선로를 구성하는 모든 구간의 구간 복구지수 중 최소치로 나타내며 식(2)와 같이 표현된다.

$$FRI_j = \underset{k}{MIN}\,(ZRI_k) \quad \cdots\cdots (2)$$

선로복구지수가 FRI가 0보다 크면 선로상의 어느 구간에서 사고가 발생하더라도 레벨1연계선로를 이용하여 복구 가능하며, 0보다 작다면 레벨1 백업피더만을 이용해서는 정전이 발생했을때 복구할 수 없는 구간이 존재한다.

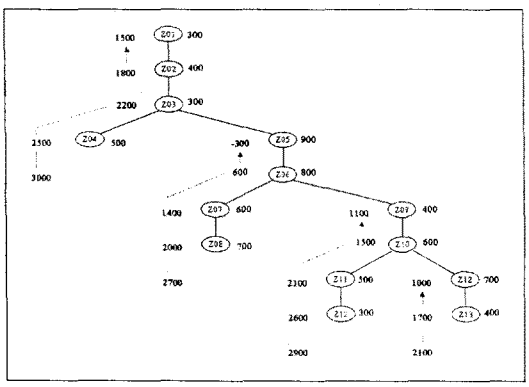
2.1.3 ZRI 계산 알고리즘

배전선로는 평상시 방사상으로 운전되므로 트리형태의 자료구조로 나타낼 수 있다. 구간을 노드로 하고 전력의 공급방향을 따라 부모-자식 노드로 관계를 가지는 트리구조로 표현하면 〈그림 4〉와 같이 된다. 각 노드의 구간복구지수는 자식노드들의 구간복구 지수 중 최대치에서 두 노드를 연결하는 구간의 부하를 뺀 값으로 결정되며, 자식노드가 말단인 경우 자식노드의 구간복구지수는 해당 연계선로의 공급여유용량에서 자식노드의 구간부하를

값으로 결정한다. 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
```

〈그림 4〉는 구간을 노드로 하는 배전선로의 트리구조와 각 노드의 구간별 부하 및 구간복구지수 계산결과를 나타낸다. 화살표로 나타낸 점선은 주연계선로가 같은 구간들을 연결한 것으로 구간복구 지수의 계산경로이다.



〈그림 4〉 ZRI를 계산하기 위한 트리구조

2.2 선로 복구지수 체크포인트

〈그림 3〉에서 각 구간의 복구지수는 전원측 개폐기에 나타내었으며 화살표는 복구경로이다. 각 경로에 대하여 전원측 구간 복구지수는 항상 부하 측 구간 복구지수 보다 작으므로 구간 복구지수(ZRI)의 최소치는 화살표로 나타낸 복구경로의 끝점에 위치한다. 따라서 선로의 복구능력을 나타내는 선로 복구지수(FRI)를 결정하기 위해선 복구경로 화살표에서 전원측 마지막 포인트만을 체크하면 된다. 즉 모든 구간의 구간 복구지수를 검사하는 대신 S01, S06, S11, S16의 최소치만을 검사하면 선로 복구지수를 알 수 있다. 〈그림 3〉에서 선로복구지수는 1500[kVA], -300[kVA], 1100[kVA], 1000[kVA]의 최소치인 -300[kVA]으로 쉽게 결정된다.

2.3 복구지수의 응용분야

배전계통의 복구능력 평가지수인 구간 복구지수와 선로 복구지수는 평상시 운전이나 배전계통의 계획 및 설계에 사용될 수 있다. 평상시 운전상태에서 배전운영자들은 사고시 정전구간이 잘 복구될 수 있도록 유지하여야 하므로 본 논문에서 제시된 평가지수를 이용하여 계통의 복구능력을 평가함으로서 쉽게 계통의 복구가능여부를 판단할 수 있다. 만약 복구능력이 부족하다고 판정되면 타이스위치의 위치를 옮김으로서 복구가 가능한 시스템으로 변경할 수 있다. 또한 사고가 발생하여 정전복구 방안을 도출 할 때도 응용할 수 있는데, 사용 가능한 몇 가지 복구방안 중에서 선로 복구지수가 높은 방안을 선택함으로서 정전복구로 변경된 계통이 계속 또 다른 사고에 대비하여 일정한 수준의 복구능력을 유지할 수 있다. 배전계획이나 설계의 측면에서 본다면 선로 복구지수는 타이스위치와 분기점의 위치를 적절히 선정하기 위하여 최적의 계통구성을 탐색하는데 유용하다. 부하분할스위치의 위치도 이러한 관점에서 결정될 수 있다. 배전자동화 시스템에서는 주어진 평가지수를 이용하여 자동화스위치의 위치를 결정하는데 사용될 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 선로상의 어느 위치에서 사고가 발생하더라도 모든 정전구간이 100% 복구될 수 있음을 나타내는 필요충분조건을 제시하였다. 배전계통의 복구능력은 선로 복구지수(FRI)를 통하여 정량화 될 수 있다. 제안된 지수들은 평상시 운전뿐만 아니라 배전계획이나 설계분야에서도 다양하게 응용될 수 있다. 특히 사고발생시 정전구간이 연계선로로 잘 복구될 수 있는 계통을 구성하는데 매우 유용하다.

[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, pp. 1177-1185, October 1987.

[2] 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.

[3] C.H. Castro, J.B. Bunch and T.M. Topka, "Generalized Algorithms for Distribution Feeder Deployment and Sectionalizing", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-99, No. 2, pp. 549-557, Mar./Apr. 1980.

[4] A.L. Morelato and A. Monticelli, "Heuristic Search Approach to Distribution Restoration", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 4, No. 4, pp. 2235-2241, Oct. 1989.

[5] 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.