

배전계통 정전복구능력 평가방법의 응용

임성일, 하복남, 조남훈
한전 전력연구원

이승재
명지대학교

Applications of Restoration Conditions in Distribution Automation System

Seong Il Lim, Bok Nam Ha, Nam Hoon Cho
Korea Electric Power Research Institute

Seung Jae Lee
Myong-ji Univ.

Abstract - This paper presents a methodology to evaluate the restoration capability of the feeder and its applications to the system planning and operation in the normal and emergency states. The proposed method is very simple and practical, so its application to the real system operation is expected to increase the system reliability.

1. 서 론

방사상으로 운전되는 다중연계방식의 배전계통을 운영하는데 있어서 가장 중요한 것은 사고가 발생했을 때 사고구간 부하측의 안전한 정전구간을 이룬한 연계선로로 절체하여 신속히 전력공급을 재개할 수 있도록 정전복구능력을 유지하는 일이다. 즉, 전력설비를 신설하기 위한 계획단계, 부하의 변화에 대응하는 정상시의 운전상황 또는 사고발생, 작업정전대비, 과부하해소등을 위한 부하절체에 있어서 계통을 구성할 때 먼저 복구능력이 최우선으로 고려되고 이것이 보장된 다음에야 손실 등의 운전조건 개선문제들이 고려된다. 배전계통을 정전복구능력이 잘 갖추어지도록 구성하기 위한 연구는 있어왔지만 정전복구능력을 직접적으로 계산하지는 못하고 대부분 선로부하에 대한 연계선로 공급여유용량의 비를 크게 하거나(3) 선로간의 부하를 균등하게 배분하는 등의 간접적인 방법을 사용하여 왔다. 이러한 방법들은 전체 계통의 대략적인 복구능력을 개선하기는 하지만 각각의 구간에 대하여 복구 가능함을 확신할 수 있는 필요충분 조건은 아니다.

본 논문에서는 배전계통의 복구능력을 판단할 수 있는 복구가능조건과 이를 이용하여 배전운영 전반에서 공급신뢰도를 향상시키는 방법을 제시한다. 제안된 복구가능조건을 만족하면 선로상의 어느 구간에서 사고가 발생하더라도 부하 측의 모든 정전구간 복구될 수 있음을 100% 보증할 수 있으며 계산방법이 매우 간단하고 연산량이 적어 실제적으로 적용될 수 있다. 또한 이러한 복구조건을 이용하여 복구능력이 확보되는 범위내에서 선로손실이 최소화되는 최적의 배전계통을 구성하고, 부하중가시 상시 연계점을 변경하여 복구능력이 유지하고, 사고발생시 정전복구후의 계통도 또 다른 사고에 대비할 수 있도록 구성되는 부하절체 방안을 도출할 수 있다.

2. 본 론

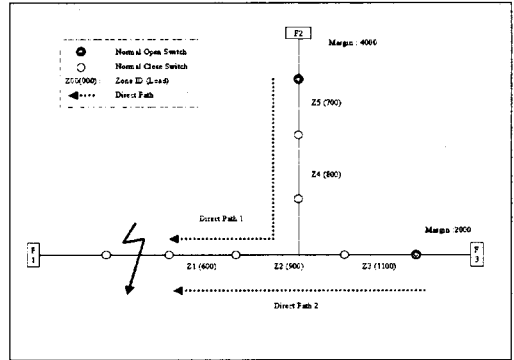
2.1 정전복구능력 평가방법

2.1.1 복구 지수

배전계통의 정전복구능력을 평가하기 위하여 사용되는 몇가지 용어들을 소개한다. 선로의 복구능력은 구간복구지수의 최소치로 나타내어지며, 구간복구지수는 직선경로부하와 후비연계용량을 이용하여 계산된다.

직선경로 부하

어떤 구간으로부터 다른 선로가 연계되어 있는 상시 개방스위치(tie)까지의 직선경로 상에 있는 구간부하의 합계를 직선경로부하라 부르며, 구간 Z_i 에서 연계선로 F_j 까지의 직선경로부하를 $DPL_{i,j}$ 라고 나타낸다. <그림 1>에서 구간 Z_1 에서 연계선로 F_2 까지의 직선경로부하는 구간은 Z_1, Z_2, Z_4, Z_5 로 이루어지며 $DPL_{1,2}$ 는 3000 [kVA]이다.



<그림 1> 세 개의 선로로 구성된 배전계통

후비연계 용량

하나의 선로가 어떤 구간에 대하여 연계선로서 얼마나 많은 공급여유용량을 제공할 수 있는가를 나타내는 지수이다. 연계선로의 공급여유용량에서 어떤 구간까지의 직선경로부하(DPL)을 뺀 값으로 정의하며 구간 Z_i 에 대한 연계선로 F_j 의 후비연계용량은 ZSC_{ij} 라고 표현한다. <그림 1>에서 $ZSC_{1,2}$ 는 F_2 의 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

구간복구지수는 어떤 구간이 전원 측 사고로 인하여 정전되었을 때 부하 측의 연계선로가 이 구간을 복구할 수 있는 충분한 공급여유용량을 가지고 있는지를 나타낸다. 부하 측의 연계선로 중 후비연계용량이 가장 큰 연계선로를 '주연계선로'라 부르며, 어떤 구간의 구간복구지수는 주연계선로의 후비연계용량으로 나타낸다. 구간 Z_i 에 대한 구간복구지수는 ZR_{i1} 로 표시하며 후비연계용량(ZSC)를 이용하여 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$ZR_{i1} = \text{MAX}_j (ZSC_{ij}) \dots\dots\dots (1)$$

<그림 1>에서 Z_1 의 구간복구지수는 연계선로 F_2 가 제

공하는 1000[kVA]와 연계선로 F₃이 제공하는 -600[kVA]중 큰 값인 1000[kVA]이다.

선로 복구지수

선로복구지수(FRI)는 선로상의 어느 구간에서 사고가 발생하더라도 사고구간 부하 측의 모든 정전구역이 복구될 수 있을지 아닌지를 나타내는 지수이다. 선로 복구지수는 그 선로를 구성하는 모든 구간의 구간복구지수 중 최솟치로 나타내며 식(2)와 같이 표현된다.

$$FRI_i = \min_k (ZRI_k) \dots\dots\dots (2)$$

선로복구지수가 0보다 크면 선로상의 어느 구간에서 사고가 발생하더라도 모든 정전구간이 복구 가능하며, 0보다 작으면 구간복구지수가 0보다 작게 나타나는 구간이 복구 불가능하다.

2.1.2 정전복구 가능조건

배전선로상의 어느 구간에서 고장이 발생하더라도 고장구간 부하 측의 모든 건전한 정전구간이 레벨1연계선로만을 사용하여 100% 복구될 수 있는 필요충분조건은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$ZRI_i > 0, \forall i \dots\dots\dots (2)$$

식(2)는 앞서 설명한 바와 같이 모든 구간에 대하여 부하 측에 그 구간으로부터 상시 연계점까지 직선경로상의 부하(DPL)을 담당할 수 있는 연계선로(ZSC>0)가 적어도 하나이상 존재한다는 것을 의미한다. 만약 어떤 배전선로가 위식을 만족한다면, 임의의 구간에서 사고가 발생했을 때 그 구간으로부터 하나의 연계선로까지 직선경로상의 부하는 복구 가능하고, 나머지 부하 중에서 복구된 직선경로의 분기점으로부터 또 다른 하나의 연계선로까지 직선경로상의 부하는 복구 가능하다. 이러한 방법을 모든 가지 부하에 대하여 반복 적용하면 모든 정전구간은 복구 가능하다. 만약 어떤 배전선로가 위식을 만족하지 못한다면 직선경로상의 부하를 담당할 수 있는 연계선로가 없는 구간(ZRI(0)의 직상위 전원 측 구간에서 사고가 발생하면 그 구간은 어떠한 연계선로로도 절체될 수 없음이 당연하므로 그 선로는 모든 구간이 복구 가능하지는 않다. 따라서 식(2)를 만족하는 선로는 모든 구간이 복구가능하고, 만족하지 못하는 선로는 복구 불가능한 구간이 존재한다.

2.2 정전복구능력 평가방법의 응용분야

2.2.1 상시연계점 최적화

방사상 배전계통에서 최적의 상시 연계점을 탐색하여 배전선로를 재구성하는 일은 대표적인 조합최적화 문제로서 많은 연구가 수행되어 왔다. 제한된 시간내에 최적해에 접근하기 위하여 분지한계법, 분기교환법, 시뮬레이션, 유전알고리즘, 진화계산, 타부써치 및 유전알고리즘(4)을 적용하는 방법들이 제안되었다. 그러나 탐색방법에 관계없이 이들 대부분은 손실최소화나 부하균등화를 목적함수로 하므로 배전선로의 운영에 가장 중요한 복구능력을 직접적으로 고려하고 있지는 못하다. 본 논문에서는 배전계통 최적화의 목적함수를 정전사고시 복구능력 확실히 보장하는 범위내에서의 선로손실 최소화도 두고 탐색방법으로서 최근 널리 사용되고 있는 유전알고리즘을 사용하는 방법을 제시한다.

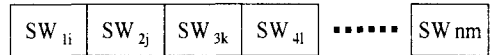
유전알고리즘은 선택도태나 돌연변이같은 생물진화의 원리로부터 착안된 이론으로서 전역적 최적해를 탐색하는데 유리하며 특히, 조합최적화 문제의 해를 구하는데 유용하다고 알려져 있다. 유전알고리즘으로 해를 탐색하는 일반적인 절차는 다음과 같다.

- ① 초기 해집단 구성 : 해공간에서 임의의 개체들을 추출하여 초기 개체집단을 구성함
- ② 재생산 : 각 개체에 대하여 적응도를 계산하고 우수한 개체들을 선택함
- ③ 교배와 돌연변이 : 재생산 단계에서 선택된 개체들에 대하여 염색체를 조합하여 바꾸거나 임의의 유전자를 일정한 확률로 변화시키는 조작을 하여 새로운 개체를 생성함
- ④ 한 세대의 개체가 정해진 개수에 이를때까지 ③의 과정을 반복함
- ⑤ 새로운 세대를 생성하는 반복이 정해진 횟수에 이를때 까지 ②~④의 과정을 반복함

재생산 방법, 교차 비율, 돌연변이 비율등 유전알고리즘의 탐색능률을 향상시키기 위하여 각종 계수들의 결정은 다음 과제로 남겨두고, 여기서는 해집단의 구성방법과 적응도 함수만을 소개한다.

해집단 구성

어떤 배전계통을 방사상으로 구성하는 타이스위치가들이 있다고 할 때 각각의 타이스위치로부터 투입된 스위치들을 따라 탐색하다보면 양쪽으로 두 개의 CB를 만나게 되는데, 이 두 CB를 잇는 직선경로를 루프라고 부르게 한다. 하나의 개체를 구성하는 스트링은 <그림 2>와 같이 각각의 유전자좌는 하나의 루프에 대응되어 루프상의 임의의 스위치가 오게 된다. 물론 이렇게 생성된 개체들 중에는 계통을 방사상으로 구성하지 못하는 개체도 있으므로 방사상조건을 검사하여 이러한 개체들을 제거하여야 한다. 그림에서 스위치이름의 첫 번째 첨자는 루프번호를 나타내고 두 번째 첨자는 그 루프상에서 임의의 스위치를 나타낸다.



<그림 2> 스트링 구성

적응도 함수

적응도 함수는 식(3)과 같이 각 항을 0에서 1사이로 정규화한 네가지 요소의 합계로 나타낼 수 있다.

$$F_{fitness} = F_1(P_L) + F_2(V_D) + F_3(S_{kVA}) + F_4(RC) \dots\dots\dots (3)$$

식에서, P_L : 각 DL별 선로손실의 합계

V_D : 전압강하의 최대치

S_{kVA} : DL부하량의 최대치

RC : 선로 복구지수의 최소화치

적응도 함수에서 두 번째, 세 번째는 꼭 만족해야 하는 제약조건으로 조건을 만족하면 1, 그렇지 않으면 0의 값을 가진다. 계통의 복구능력은 네 번째 항에 나타내었는데 RC = $\min_i (ZRI_i)$ 로서 구간복구지수가 0보다 작은 구간이 있으면, 즉 어느 한 구간이라도 임의의 사고에 대하여 복구 불가능한 구간을 포함한 개체는 낮은 적응도를 가지게 하여 다음 세대로 넘어가지 못하게 함으로서 모든 구간이 복구가능한 범위내에서 선로손실이 최소화되도록 하였다.

2.2.2 부하변화에 대응

처음 어떠한 부하상황에서 모든 경우에 복구가능 하도록 선로를 구성하였다 하더라도 시간이 지나면서 부하가 증가하면 복구 불가능한 구간이 발생하게 된다. 부하변

화에 대응하여 계통을 계속적으로 복구 가능한 상태로 유지하려면 상시 연계점을 이동하여 선로간 공급여유량을 재조정하여야 한다. 즉, 주기적으로 모든 선로에 대하여 구간복구지수(ZRI)를 재계산하여 마이너스인 구간이 있으면, 모든 구간의 ZRI가 플러스가 되도록 부하를 절체하여야 한다. 복구능력을 개선하기 위한 부하절체 방안은 다음의 두 단계를 거쳐 수립된다. 첫 번째는 제약조건을 만족하는 실행 가능한 부하절체방안 후보를 탐색하는 단계이고 두 번째는 실행 가능한 부하절체 방안 후보들 중에서 몇가지 고려사항을 종합적으로 평가하여 최선의 해를 선택하는 단계이다.

후보 탐색 단계

부하절체방안 후보는 복구불가능 구간에 공급하는 ZSC가 큰 연계선로로부터 작은 연계선로로 다음의 제약조건을 만족하는 스위칭 조합을 탐색한다. 실행가능한 부하절체 방안은 다음의 제약조건을 만족하여야 한다.

- 절체되는 부하량이 ZRI 부족분 보다 커야 한다.
- 부하를 절체받은 선로의 부하량이 허용용량을 초과하지 않아야 한다.
- 부하를 주연계선로로 절체하였을 때 전압강하가 허용기준치를 넘지 않아야 한다.
- 부하절체로 인하여 다른 선로의 복구능력 부족이 발생하지 않아야 한다.

피지 평가 단계

실행가능한 후보스위칭 중에서 최선의 해를 선택하기 위해 절체부하량, 선로손실, 부하균등화의 세가지 기준이 적용된다. 각각의 기준은 해당되는 피지표를 이용하여 별도로 평가되며 피지평가결과는 가중치합계를 통하여 종합된다. 피지표는 평가는 최대-최소법을 이용하여 합성되고 무게중심법을 이용하여 비피지화 된다. 고려사항들은 다음과 같다.

- 절체 부하량 최소화 : 현재의 계통구성에서 크게 변화하지 않도록 꼭 필요한 양 만큼 절체되도록 한다.
- 부하균등화 : 부하의 편중을 방지하고 선로전체의 이용율을 향상시킨다.
- 선로손실 최소화 : 계통의 복구능력이 확실히 확보된 상태이므로 선로손실을 최소화하는 것이 의미가 있다.

2.2.3 정전복구방안 후보도출 방법 개선

방사상으로 운전되는 배전계통에 사고가 발생하면 사고구간 부하측의 건전한 정전구간을 이뒀한 연계선로로 절체하여 신속히 전력공급을 재개하여야 한다. 배전선로는 상시개방 스위치들이 있어 분할 가능하고 여러개의 연계선로에 다중 연계되어 있으므로 일반적으로 선로의 제약조건을 만족하는 실행 가능한 다양한 조합의 복구방안이 존재한다. 저자들은 운영자들의 경험적 지식에 근거하여 여러 가지 실제적인 고려사항들을 종합적으로 평가하여 최선의 해를 도출하는 방안을 제시한바 있다[3]. 제시된 알고리즘은 크게 두가지 단계를 거쳐 수행되는데 첫 번째는 정해진 탐색순서에 따라 제약조건들을 만족하는 복구방안 후보를 도출하는 단계이고 두 번째는 고려사항들을 종합적으로 피지평가하여 최선의 복구방안을 선택하는 단계이다. 첫 번째 단계에서 사용되는 제약조건은 선로의 허용용량과 전압강하 허용치이며 탐색순서는 연계선로의 수가 적은 방안으로부터 정해진 탐색종료 조건에 이를 때까지이다. 두 번째 단계인 피지평가에서는 스위칭 수가 적고, 피더간에 부하가 균등하게 배분되며, 건전부하의 절체를 최소화하고, 마지막으로 비상대비도가 갖추어진 방안을 최선의 해로 선택한다. 여기서 비상대비도란 복구후의 계통에 또 다른 사고가 발생하였을 때 새로 생길 정전구간에 대한 복구가 가능한지 아닌지를 판단하는 기준으로서 부하를 절체받은 선로에 대한

여 담당 부하량에 대한 연계선로들의 마진 총량의 비가 크고 연계선로의 개수가 많은 방안을 좋은 방안으로 평가하였다. 여기에는 몇가지 오류가 있었는데 첫째로 복구 후에 복구능력이 감소하는 선로는 부하를 절체받은 선로가 아니고 부하를 절체받은 선로를 연계선로로 하는 선로라는 점이고, 둘째는 평가기준이 대략적인 선로의 복구능력을 나타내지는 하지만 토폴로지까지 고려한 정확한 복구능력을 나타내지는 못하다는 점이다.

본 논문에서는 이를 개선하여 부하를 절체받은 선로와 그 연계선로들의 복구지수를 계산하여 비상대비도에 대한 평가지수로 삼고자 한다. 전술한 바와 같이 이 조건을 만족하는 복구방안을 선택하면 선로상의 어느구간에 서 또 다시 고장이 발생하더라도 모든 정전구간에 100% 복구될 수 있음을 보증할 수 있다.

3. 결 론

방사상 배전선로의 운영에서 가장 중요한 것은 사고발생시 신속히 건전구간을 절체하여 전력공급을 재개하여 정전시간을 단축하는 일이다. 따라서 배전계통의 계획 및 운영의 전반에 있어 선로의 복구능력을 확보하는 것이 최우선으로 고려되어야 한다. 본 논문에서는 배전계통의 복구능력을 평가하는 방법과 이를 이용하여 어떠한 사고에 대해서도 복구가능 하도록 선로를 구성하는 상시연계점 위치선정, 부하증가시 복구 불가능구간을 찾아내는 방법과 상시연계점의 위치를 이동하므로써 계속적으로 복구능력을 유지하는 방법 및 사고발생에 의한 정전 부하 절체시 또 다른 사고에 대비 할수 있는 복구방안 후보를 도출하는 방법을 제시하였다.

[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] 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.
- [4] K. Nara. et. al, "Implementation of Genetic Algorithm for Distribution System Loss Minimum Reconfiguration", IEEE Trans. on Power System, Vol, No 3, August 1992
- [5] 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.