

신 배전자동화시스템의 배전선로 고장복구 알고리즘

조남훈, 하복남, 이중호
전력연구원

The Service Restoration Algorithm of The New Distribution Automation System

Namhun Cho, Boknam Ha, Jungho Lee

Abstract - This paper introduce an algorithm for service restoration in electric power distribution systems. Power utility performs service restoration in order to restore out-of-service areas at fault. Developing effective service restoration program is a cost-effective approach to improve service reliability and to enhance customer satisfaction. The main objective in service restoration program is to restore as much load as possible by transferring de-energized loads via network reconfigurations to other supporting distribution feeders without violating operating and engineering constrains.

1. 서 론

배전자동화시스템의 여러 가지 처리기능 중 배전선로에 사고가 발생한 경우 고장구간을 신속하게 판단하여 고장구간 양단을 분리하고, 부하측 건전구간은 인근의 타 배전선로로부터 전력을 공급받을 수 있도록 하는 것을 선로자동화 기능이라 한다. 이러한 선로자동화기능을 원활히 수행하기 위해서는 사고구간 이후의 건전 정전구간의 부하량을 산정하고, 사고선로와 연계된 선로를 찾아 평가요소(Factors)를 고려하여 가장 최적의 방법으로 배전계통 재구성(Reconfiguration)안을 제시하여야 하는데 이와 같은 과정을 수행하는 전반적인 절차를 고장복구 알고리즘이라고 정의할 수 있다.

본 논문에서는 고장복구 알고리즘의 수행 절차 및 최적의 개폐기 절체 조작순서를 계산할 때 필히 위반여부를 검토해야 하는 제한요소와 최적의 해를 찾기위해 고려하는 고려요소에 대하여 기술하고자 한다.

2. 본 론

2.1 고장복구 알고리즘 수행 절차

2.1.1 Data Loading

배전자동화 고장복구 알고리즘을 수행하기 위하여 일반적으로 시스템 시작시 DB Node에서 필요한 Data를 읽어 고장복구 알고리즘에 반드시 필요한 정보만을 메모리에 Loading 시켜 효율을 극대화한다. 이때 메모리 관리를 효율적으로 하기 위하여 일반적으로 각 데이터 자료가 포인터에 의해 연결될 수 있는 연결리스트 구조로 작성한다. 연결리스트의 각 자료(노드)는 자기참조 구조체로 되어 있으며, 노드의 포인터 멤버의 값을 다음 노드의 시작 주소로 함으로써, 다음 노드를 가리키게 한다.

가리키는 노드가 없을 때에는 포인터 멤버의 값을 NULL로 하여 마지막임을 알린다. 각 노드는 메모리상에서 이웃해 있지 않을 수도 있으며, 자료발생시에만 메모리를 할당(malloc())하여 자료를 수록하고, 자료가 필요 없어지면 해당 노드에 대

한 메모리 영역을 자유영역으로 해제한다(free()).

2.1.2 계통연결성 탐색

변압기 데이터, 배전선로 데이터, 개폐기 데이터, 구간(Zone) 데이터 등 다양한 데이터들을 토대로 주 변압기, 배전선로, 구간(Zone), 절체하고자 하는 선로의 연계점 및 계통의 연결성을 탐색알고리즘에 의해 탐색(Search)한다.

위와 같은 연결성을 탐색하는 알고리즘이 얼마나 효율적인가에 따라 선로자동화의 전체적인 Performance가 결정되는 핵심적인 부분이며, 실제 완성된 고장복구 프로그램을 검증할때에도 임의의 선로데이터를 데이터 입력부를 통하여 입력후 임의의 구간 혹은 스위치에 고장을 알려준 후 얼마나 정확한 해를 제시하는지 확인 되어져야 할 것이다. 물론 고장복구 알고리즘은 반드시 그래픽 톨과 연계되어 데이터의 정보를 주고 받아야 하므로 그래픽 톨과의 정확한 데이터 인터페이스를 사용자 측에서 개발자에게 결정하여 주어야 한다.

2.1.3 부하절체 후보작성 알고리즘

계통연결성 탐색을 통하여, 구간부하 절체시 정전구간 부하를 절체 받을 연계선로의 개폐기, 연계선로 등을 찾아 정전구간을 복구할 수 있는 후보(Candidates)들을 제시한다.

평가 요소들(Factors)에 의하여 각 부하복구 방안 후보들을 평가하고, 평가결과에 따라 배전선로 운영시 제한요소에 해당되는 전압강하 등에 의해 후보가 될 수 없는 복구방안은 삭제하고 나머지 부하복구방안 후보들을 가지고 평가 우선 순위별로 다시 재 정렬하여 운영자에게 고장복구 해를 제시한다.

2.1.4 복구 방안 제시

운전원은 고장복구 알고리즘이 제공한 복구 방안을 참고로 하여 복구조작을 수행한다. 운전원이 수행한 복구 조작 내용은 모두 기록되며, 고장원인이 제거된 계통은 사고 이전의 상태로 복귀시키기 위하여 복구 스위칭 순서를 작성하여 운전원에게 제시한다.

2.2 제한요소

선로자동화는 사고 발생시 복구방안을 제시하기 위하여 여러 가지 평가요소(Factors)를 고려하여 복구방안을 제시할 수 있다. 평가요소를 가운데 변압기용량, 선로용량, 전압강하 등은 이를 위반하였을 경우에는 복구방안 후보가 될 수 없는 요소들로서 제한요소라 하였다.

2.2.1 변압기 용량

연속 과부하의 경우 최고 허용부하는 냉각방식에 따라 차이가 있지만 다음(표 1)과 같이 120%~125%까지 과부하 운전할 수 있다.

<표 1> 변압기 냉각방식에 의한 최고허용부하

냉각방식	최고허용부하(%)
자냉식, 풍냉식, 송유풍냉식	125
수냉식, 송유풍냉식	120

변압기 최대이용률은 bank사고를 고려한 이용률에 따라 결정되는데 국내 대도시 주변압기 bank수는 2~3bank가 주류를 이루고 있지만 장차 3~4bank변전소가 늘어날 전망이다. 한편 개 bank사고시 변압기 이용률한도가 3bank 경우에는 83.3%, 4bank경우에는 93.8%가 된다. 이는 1bank 사고시 건전 bank는 25% 과부하 운전한다는 전제하에서 계산된 값이다.

2.2.2 선로용량

22.9kV 배전선로의 회선당 운전용량은 선로에 ACSR-OC 160 mm² 및 CN/CV 325 mm² 선전선을 사용하고 3분할 3연계된 계통을 기준으로 하였을 때 다음<표 2>과 같으며, ACSR-OC 전선의 굵기에 따른 전선의 허용전류는 동일 단면적의 ACSR전선에 비해 공급능력 저하 10%를 감안한다. 선종별 허용전류는 다음 <표 3>과 같다.

<표 2> 운전용량과 기준최대공장

전압별 (kV)	기준용량 (kVA)	회선당 운전용량(kVA)		기준최대공장 (km)
		상시	비상시	
6.6	3,000	2,100	-	20
22.9	10,000	10,000	14,000	34

<표 3> 선종별 허용전류

선종	ACSR 160	ACSR 95	ACSR 58	ACSR 32
허용전류 (A)	460	330	240	160

① 상시 운전용량

상시 운전용량은 평상시의 운용(運用) 최대용량으로서 변전소 주변압기의 용량, 배전선의 열적 허용전류, 선로 전압강하, 비상시 부하전환능력, 선로의 분할 및 연계 등 선로 여건에 따라 약간씩 조정될 수 있으나 배전계통 고장복구 알고리즘에서는 <표 2>의 제한조건에 만족하도록 한다.

② 비상시 운전용량

비상시 운전용량은 선로사고에 따른 부하전환 등 비상시의 운용(運用) 최대 용량으로서 변전소 주변압기의 용량범위내에서 전선로의 상태, 배전선의 열적허용전류 및 선로 전압강하제한 요소에 문제가 없을 때 <표 2>의 운전용량에 제한조건에 따른다.

③ 각 구간별 선종 및 설치 기기의 허용정격을 만족하여야 한다.

2.2.3 전압강하

전압강하 제한조건을 검사하기 위하여 일반적으로 조류계산을 실시하고 있다. 복구방안을 구하기 위하여 연계 개폐기를 검색하는데 연계 개폐기가 검색되었을 때마다 계통을 바꾸어 각 각의 경우에 대하여 조류를 계산을 시행한다는 것은 고장 복구 알고리즘을 수행하는데 있어서 많은 시간이 소요되므로, 우선 변압기 및 Feeder의 용량 제한조건을 만족하는 범위에서 절체방안을 제시 후 선로단단의 전압강하 제한요소를 검사하여 후보에서 제외시켜 성능을 향상시킨다.

<표 4> 전압의 유지범위

공칭전압(V)	전압유지범위 (V)
고압	6,600 / 6,000~6,900
특고압	13,200 / 12,000~13,800 / 22,900 / 20,800~23,800

2.3 고려요소

평가요소들 가운데 제한요소는 아니지만 선로운영을 효율적으로 하도록 운영자가 일정한 지수를 두어 평가 결과대로 복

구방안을 선택할 수 있도록 할 수 있는 고려요소에 대하여 기술하였다.

2.3.1 부하분담 균등화

부하분담 균등화는 계통상의 주변압기나 배전선로들의 이상적 부하와 실제 부하의 차를 최소화하는 문제로서, 부하용동시 정전구간을 가급적 주변압기나 배전선로에 고르게 분담시킴으로써 특정 주변압기나 배전선로가 심각한 과부하나 중부하를 경험하는 것을 방지한다.

따라서, 전력 공급의 안정성을 확보함과 동시에 건전 정전구간의 최소화를 도모하며 배전선로의 접속개소에 설치되는 접속 슬리브의 열화에 의한 이완이나 용단 현상으로 선로가 단락 되어 발생하는 정전 사고를 방지할 수 있다. 처리과정은 다음과 같이 두 단계로 나누어 생각할 수 있다.

① 주 변압기 부하분담 균등화

주 변압기들이 서로 균등하게 부하를 분담하도록 스위칭 순서를 결정한다.

② Feeder 부하분담 균등화(Feeder Load Balancing)

주 변압기가 부하분담 균등화를 이룬 상태에서 주변압기(MTr)에 소속된 각각의 Feeder가 부하를 균등하게 분담하도록 스위칭 순서를 결정한다. 부하분담을 위와 같이 두 단계에 걸쳐서 시행함으로써 주변압기나 선로의 과부하 해소, 설비 교체시기의 지연을 통한 투자비의 경감, 예비력의 평균화를 통한 정전구간에 대해 융통가능성 증대의 효과를 기대할 수 있다.

2.3.2 정전구간 최소화

가능한 정전구간이 발생하지 않도록 부하절체 방안을 제시하는 것이 원칙이지만, 모든 절체 가능한 연계피더를 검색하여도 부하용량 제한조건, 전압강하 제한조건등이 위반되어 절체하지 못한 정전구간이 발생하였을 경우에 위반 내용을 운영자에게 알려서 정전구간을 최소화할 수 있도록 한다.

2.3.3 건전부하 절체 최소화

선로자동화 알고리즘은 정전구간의 부하를 이완하는 연계선로에 절체하고자 하였으나, 불가능하게되면 정전구간을 최소화하기 위하여 Backup Feeder가 될 건전선로의 부하일부를 다른 선로로 절체하여 더욱 많은 부하를 절체 받을 수 있도록 복구방안을 제시한다.

그러나 건전부하 절체 최소화 원칙에 따라 고장구간과 연계 가능한 Backup Feeder 전부를 탐색하여 용량을 계산한 후, 도저히 불가능하다고 판단되면 건전부하를 절체하여 복구방안을 제시하되, 이때에도 건전부하 절체가 최소화 되도록 한다.

2.3.4 개폐기 조작횟수 최소화

개폐기 조작횟수 최소화는 부하절체시 개폐기의 조작횟수를 최소화하기 위한 목적으로써, 개폐기 조작명령이 통신 신뢰도 및 기기 신뢰도 문제로 실패하는 경우 사고 파급효과가 확대될 수 있고, 개폐기 조작에 따른 내용년수 감소비용을 절감할 수가 있다. 개폐기 조작횟수의 최소화 문제는 다음과 같이 두 가지로 나누어 고려할 수 있다.

① 자동화개폐기 조작횟수 최소화

배전자동화시스템에서 자동화기기의 신뢰도는 상당히 높으며, 개폐기조작 회수를 줄임으로 인한 개폐기의 내용년수 감소비용 효과는 적으므로, 자동화개폐기 조작횟수의 최소화 평가지수는 낮아야 할 것이다.

② 수동개폐기 조작횟수 최소화

정전구간 부하를 복구하기 위해서 부득이 하게 수동개폐기를 조작하여야 할 경우 사령원이 직접 개폐기가 설치된 현장에

출동하여 개폐기를 ON/OFF 하여야 하므로, 이에 대한 출동 시간 및 인력이 많이 소요된다. 따라서 수동개폐기 조작횟수의 최소화 평가지수는 높아야 할 것이다.

2.3.5 선로손실 최소화 (Loss Minimization)

배전선로의 손실 감소는 전력사업 경영에 직결되는 중요한 과제로서 배전손실율은 1.29%('98.6월 기준)에 달한다. 배전 자동화시스템에서 고장복구 및 평소 선로 운전시 선로손실을 감안하여 선로를 재구성할 수 있는 기본기능을 갖추어야 한다.

2.3.6 보호기기 협조

선로사고 및 작업등으로 인하여 부하가 연계선로로 절체되었을 경우, 보호협조를 변경된 선로를 기준으로 다시 정정해 줄 수 있어야 한다. 지금까지는 선로사고 발생 후 몇 시간 이내에 고장원인을 제거한 후 선로를 원상태로 복구하였으므로 보호협조를 비중 있게 취급하지 않았지만, 향후 배전자동화 선로에서는 타이개폐기의 개념이 없이 배전손실 최소화나 부하 균등화 등을 고려하여, 선로를 재구성하여야 할 것이므로 보호협조가 더욱 중요한 고려사항이 된다.

2.3.7 비상사고 대비

고장이 발생하여 부하를 절체 받아 운영하는 선로에서 사고가 발생하였을 때의 복구 대비도를 고려하여 부하절체방안을 제시할 수 있도록 고려하는 것으로, 연계선로를 결정할 때 비상고장을 대비하여 구간의 허용용량을 고려하여 여유 Margin을 크게 고려하는 것이다.

2.3.8 배전선로 신뢰도 최대조건

배전자동화시스템을 운영하면서 사고시마다 사고원인, 사고이기, 사고 Feeder 및 고장구간을 Data로 구축하여 가능한 과거 고장이력이 높은 선로나 구간에 낮은 평가 점수를 주어 가능한 부하가 그 곳으로 절체되지 않도록 한다.

2.3.9 중요수용가 우선권 (Customer Priority)

다중 사고발생 및 광역정전으로 인하여 정전구간이 넓어 우선 순서를 두어 복구방안을 제시하여야 하거나, 전 구간을 모두 복구하지 못할 경우 각 구간별 중요수용가를 입력하여 부하용량시 중요수용가가 포함된 구간이 정전이 되지 않도록 중요수용가에 우선권을 두어 부하절체방안을 제시하도록 한다. 중요수용가 우선권은 중요하므로 중요수용가를 살리기 위해서 일부 정전구간이 커지더라도 고려하여야 할 것이다.

2.3.10 상 불평형

선로에 불평형이 발생하면 중선선에는 각상 전류와 위상차에 의한 벡터 합의 전류가 흐르게 된다. 선로의 불평형율은 3상4선식은 30% 이하, 3상3선식은 40%이하를 유지하도록 되어 있다.

각 구간 상별로 측정된 전류값 및 각 구간별 전류값을 분석하여 각 구간별 불평형율을 고려하여 부하절체를 통하여 불평형을 해소할 수 있는 방안 및 구간별 불평형을 해소할 수 있는 방안을 제시하여 선로 불평형 시정공사의 기본자료를 제공할 수 있도록 하여야 한다.

2.4 선로자동화 인출력 데이터

전후단 개폐기의 정보는 배전계통 고장복구 알고리즘중 구간 (Zone) 탐색 (Searching) 알고리즘을 수행하기 위한 가장 기본적인 중요 요소이다.

초기 구간탐색에 필요한 데이터입력시 운영자가 얼마나 빠르고 쉽게 입력할 수 있는가에 대한 평가와 입력된 데이터를 내부적으로 얼마나 효율적으로 처리할 수 있는가가 전체적인 시스템의 성능에 큰 영향을 준다.

배전선로 구간 정보를 시스템에 인지시키기 위하여 작성하는 기본 데이터는 다양하지만 가장 양이 많고 입력데이터의 대부

분을 차지하는 것이 배전선로 구간데이터이다. 배전선로 구간 데이터를 입력하기 위해서는 시스템에서 요구하는 테이블에 맞추어 입력할 실계통 데이터를 사명실에 있는 계통도를 통하여 다음과 같은 2가지 방법으로 작성할 수 있다.

데이터 자체에 방향성을 가지지 않고 작성되어 내부에서는 논리적으로 방향성을 갖게 하는 방안과 데이터 자체에 방향성을 갖도록 테이블을 작성하여 입력하는 방안이 가능하다. 일반적으로 전자는 기본데이터 입력이 쉬워 잘못 입력할 수 있는 가능성이 적은 대신 방향성이 없는 데이터를 프로그램 내부적으로 방향성을 주어 연결리스트나 트리 형식으로 변환하여 방향성을 갖도록 하는 방안이며, 후자는 처음부터 데이터에 방향성을 갖도록 작성하여 운영하는 방안으로서 데이터 입력이 전자보다 쉽지 않으며 데이터 입력 자체에 방향성을 주므로 데이터 입력방안이 오직 한가지 방법밖에 없어 융통성이 없기 때문에 바람직하지 않다.

2.4.1 방향성을 갖는 구간데이터 테이블

방향성을 갖는 선로구간 레코드는 선로구간 정의를 위하여 시작점(전원측), 끝점(부하측)데이터를 필요로 한다. 배전선로의 기본 구간데이터를 입력하기 위해서 다음과 같은 형식으로 이 데이터를 작성하도록 데이터 테이블이 정하여져 있다. 구간정보는 Switch와 Switch사이 혹은 Zone과 Zone사이의 스위치로 구별된다.

또한 선로구간 레코드는 선로의 전압강하 계산을 위한 선로 정수 데이터, 상위 배전선로 데이터와의 관계를 위해 배전선로 데이터, 부하가 집중부하인지 혹은 분산부하인지를 표시하는 데이터 등 여러 가지 데이터를 포함될 수 있으나 각 요소들을 객체화하여 선로구간 레코드가 메모리를 가능한 적게 차지할 수 있도록 하여 Search의 Performance를 증대시켜야 한다.

2.4.2 방향성을 갖지 않은 구간데이터 테이블

선로 구간데이터 입력 자료가 무 방향성이라는 것은 순서와 무관하게 방향성을 갖지 않고 구간에 대한 스위치 데이터만 정확하게 입력을 시키면 된다.

초기 데이터 입력시 데이터 입력의 경험이 없거나, 계통에 관한 지식이 없어도 쉽게 입력할 수 있고 오류도 방향성을 갖지 않으므로 훨씬 줄일 수가 있다.

비록 데이터 입력 시에는 방향성을 주지 않고 입력을 하지만 내부적으로 입력된 구간 및 스위치 정보를 통하여 계통을 추적할 수 있도록 선로자동화 엔진이 설계되어야 할 것이다. 무 방향성을 가진 구간데이터 형식은 다음 <표 5>와 같다.

<표 5> 방향성이 없는 선로구간 데이터(예)

구간	스위치	스위치	구간	스위치	스위치
Z1	CB1	S1	Z26	S11	S8
Z2	S1	S2	Z27	S15	CB9
Z3	S2	P1	Z28	CB5	S16

3. 결론

배전계통 고장복구알고리즘은 어느 시스템에서라도 원활히 운영되어야 한다. 이러한 프로그램을 개발하기 위해서는 우선 간단하고 오류없는 고장복구알고리즘 정립, 효율적인 평가 방안 및 향후 다양한 그래픽 툴과의 연계를 고려하여 각각의 프로시저에 따른 인터페이스를 명확히 정의하여 급속도로 발전해가는 GUI환경에 발맞추고 UNIX, NT, WIN98 등 어떤 시스템에서도 원활히 운영될 수 있는 OPEN된 프로그램으로 개발되어야 한다.

참 고 문 헌

- (1) 하복남 외, "국산 배전자동화 시스템 실계통 실증연구", 전력연구원 최종보고서, 1997.4
- (2) 하복남 외, "신 배전자동화 시스템 개발 연구", 전력연구원 1차년도 중간보고서, 1998.9
- (3) 신동준 외, "자투구조와 알고리즘", 기전출판사, 1998.8