

객체구조를 이용한 긴급상태 정전복구 시스템

Service Restorative System in Emergency State using Object-Oriented Structure

金 定 年* · 白 榮 植**

(Jung-Nyun Kim · Young-Sik Baek)

Abstract - This paper presents a new algorithm to restore the de-energized loads in electric power distribution systems for restoration by utilizing object-based structure and heuristic rules without branch and feeder overloading. In order to cope with a complex network configuration and frequent breaker switching operations in distribution systems, the component of power system is described as objects and the information of system configuration is constructed by connecting objects each other. Such a strategy is developed mainly based on the object search algorithm to increase computation efficiency. As a result, the proposed system has been implemented to efficiently deal with large distribution systems by reducing computational burden remarkably compared with the conventional methods.

Key Words : power system restoration, object based structure, heuristic rule, expert system

1. 서 론

전력계통이 거대화됨에 따라 전력공급에 대한 신뢰도는 한층 더 높아지고 있다. 전력계통의 최종단계인 배전계통의 경우 직접적으로 일반 수용가와 연결되어 있기 때문에 전력의 안정적인 공급이 더욱 중요한 문제로 대두되고 배전 자동화와 같은 계통의 최적운용에 의해 합리적이고 경제적인 운용이 필요하게 된다.

일반적으로 배전계통은 중앙제어센터에서 운용자가 계통의 사고를 감시하고 정전시에는 정전구역을 최소화시키기 위해서 정전구간의 부하를 인접한 건전구간으로 절제하게 된다. 또한 정상 운전시에 부하의 상태를 감시하여 계통을 재구성함으로써 운전손실을 최소화시키는 방향으로 계통의 재구성할 수 있다. 계통운용자가 이러한 부하절제에 따른 문제를 신속하게 처리하기에는 계통자체가 너무 방대하고 복잡하기 때문에 컴퓨터의 도움을 받아야만 한다.

반면, 고장이 발생하면 계전기와 차단기의 동작으로 고장설비가 계통에서 분리되지만 보호기기가 오동작 하면 정전의 범위는 건전한 영역으로 확대된다. 이와 같은 경우 정전범위 중 고장 발생설비와 단순히 고장파급으로 정전된 설비들을 판단하고 건전구간은 신속히 복구하는 것이 정전복구문제의 목적이다.

이러한 정전복구를 위한 알고리즘으로 Castro의 피더의 재구성법[2], Ross등은 탐색법을 이용해서 정상상태에서 최적으로 운전되도록 방사상 계통을 구성하는 프로그램을 제안하였다[3]. 그리고 근래에는 과부하지표를 이용한 국소브

랜치 교환법과 선로용량을 줄였다가 회복시켜 나가며 계통을 재구성하는 점증 최대 조류법 등이 제안되었다[4]. 또한 퍼지추론을 적용하여 정전구간의 각 부하모선의 공급타당성 지표를 이용하여 선로의 절제방안을 일괄적으로 결정하는 방법을 제안하였다[5].

본 논문에서는 배전계통을 표현하는 방법으로 전력계통 분야에서 많은 연구와 적용이 되어 온 객체지향 요소로 모델링하고 고장 복구 경험 및 관련 규정 등의 전문가의 지식을 기반으로 전문가 시스템을 구성하여 정전복구문제에 적용하였다.

2. 배전계통의 표현

정전복구는 계통 운전원들의 복구조작과정을 분석하여 다음과 같은 과정을 거친다. 즉, 고장설비를 건전계통으로 부터 분할하고 이때 정전복구는 각 단계에 있어서 차단기와 단로기의 적절한 조작순서를 결정하는 것이다. 이는 차단기와 단로기의 개폐상태로 이루어지는 조합문제로 이를 해석적으로 고려하는 경우 고려해야할 개폐기의 조합수가 상당히 많으므로 계산시간이 과대하게 걸리며 계통운용상의 제약조건으로 인하여 수학적인 정식화가 곤란하다는 특성을 가진다.

그리고, 배전계통 방사상 구조로 운용하지만 실제계통은 루프 구조로 형성되어 있다. 이들 구조가 선로 절제에 따라서 변화하므로 이를 나타내고 표현하는데는 많은 어려움이 따르며 프로그램으로 나타내기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 객체지향기법을 사용하여 선로 연결성을 나타내고 선로 구조의 변경에 쉽게 대응할 수 있는 방법을 제시한다.

한 예로써 피더를 아래와 같이 정의해서 독립된 개체로서 메시지 전달을 가능하도록 구성하였다.

* 正 會 員 : LG電線(株) 電力研究所 電力研究室 主任研究員

** 正 會 員 : 慶北大 工大 電子電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 1998年 10月 9日

最終完了 : 1999年 12月 12日

```

class feeder{
    char *name; // identifier
    DList *list; // connected lines
    ....
};
    
```

그림1은 위에 정의한 피더(Feeder)객체를 도식화한 것으로 피더는 기본적으로 계산에 필요한 데이터와 함께 시스템의 토폴라지(topology)를 결정하기 위해 다른 객체(DLine:배전선로)들의 연결 포인터를 가지고 있다. 이것을 통하여 각 객체들 사이에 메시지 전달이 이루어진다.

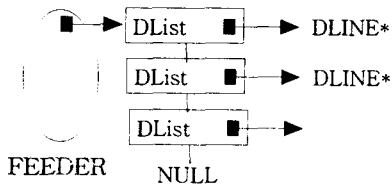


그림 1 피더의 표현
Fig. 1 Representation of Feeder object

그 외에 노드(Node), 배전선로객체(DLine), 부하(Load), 변압기(Transformer)등을 구성하며 전체 프로그램은 각각의 객체들의 연결상태와 멤버함수를 사용한 객체상호간의 메시지 전달로써 구성한다.

그림 2와 같이 배전계통을 앞에서 정의한 객체로써 표현하면 그림3과 같이 일대일 대응이 된다. 그림 1,2에서 배전선로③,⑤가 연결된 상태에서는 배전계통은 루프구조가 된다. 그러나 실제의 배전계통은 방사상 운전 원칙에 따라 운전되기 때문에 배전선로 ③,⑤가 OFF상태로 운전된다.

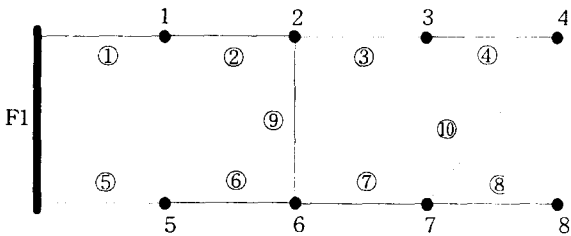


그림 2 배전계통
Fig. 2 Distribution system

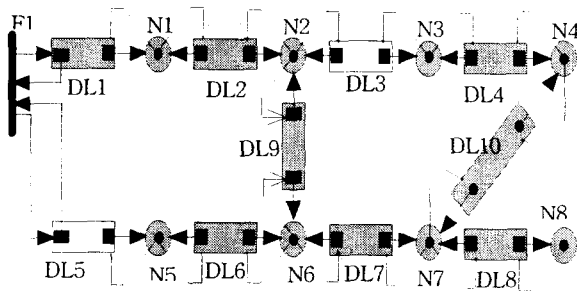


그림 3 배전계통의 객체도
Fig. 3 Object diagram for distribution system

위의 그림 2와 3은 트리구조로 각 객체들을 연결하여 전체 시스템을 구성하며 메시지는 상위노드에서 배전선로를 통해 하위 노드로 전달되는 방식을 통해 배전계통 조류를 계산을 수행한다.

3. 정전복구문제

3.1 복구가능선로 탐색과 복구선로 선택

방사상 운전조건을 만족하는 배전계통에 사고가 발생하면 정전구역과 파급고장으로 인해서 전력이 공급되지 못하는 영역으로 구분된다. 이때 파급된 정전지역 및 사고점이하의 부하점들 중 복구우선 선로를 정하는 것은 중요한 문제이다. 사고가 발생했을 경우 우선 사고설비인 계통으로부터 분리시킨 다음 정전 구역 내에 모든 선로스위치를 OFF시킨다. 다음 단계로서 정전 구역과 연결된 선로중 방사상 운전조건을 만족하는 복구 가능선로를 찾는다. 이들 복구 가능한 선로중 식1과 같이 실제 여유용량이 가장 큰 값을 가지는 선로 우선적으로 선택하여 부하를 복구한다.

$$L = \text{Max}\{AM(k), AM(k-1), AM(k-2), \dots, AM(1)\} \quad (1)$$

여기서, AM(k) 는 여유용량

이 과정을 반복하여 복구된 부하는 정전계통에서 제거되어 건전계통으로 분류되며 모든 정전부하가 복구될 때까지 또는 더 이상 대상선로가 존재하지 않을 때까지 반복한다.

3.2 여유용량계산

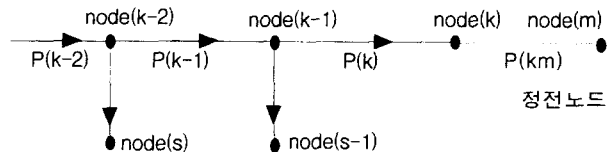


그림 4 방사상 선로에서 여유용량 계산
Fig. 4 Calculation of Margin for radial system

- P(k) : k 선로의 조류(flow)
- Pmax(k) : k 선로의 최대용량(maximum power)
- M(k) : k 선로의 여유용량(Margin)
- AM(k) : k 선로의 실제여유용량(Actual Margin)
- PL(m) : 정전모선 m의 부하량

복구가능선로로 판명된 선로 km에 대한 여유용량을 계산하기 위해서 선로k만을 고려한 여유용량을 다음 식과 같다.

$$M(k) = P_{\text{max}}(k) - P(k) \quad (2)$$

그러나 실제로 복구가능 선로의 여유용량을 결정하기 위해서는 그 선로 상위계통을 모두 고려해서 여유용량을 결정해야한다. 즉 실제여유용량은 상위 배전선로와 절제하고자 하는 선로 중 제일 작은 여유용량을 가지도록 택한다.

$$AM(km) = \text{MIN}\{M(k), M(k-1), M(k-2), \dots\} \quad (3)$$

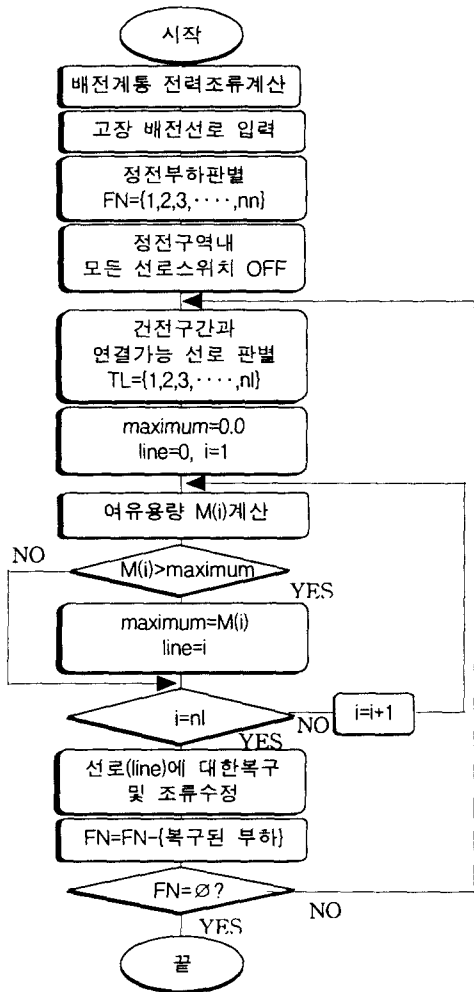


그림 5 정전복구 알고리즘
Fig. 5 Algorithm of service restoration

3. 3. 부하절체 후의 피더의 전력공급량 계산

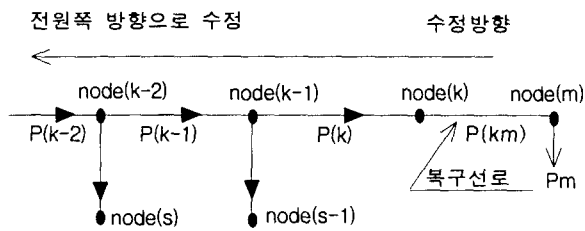


그림 6 부하절체 후 선로조류 수정
Fig. 6 Update of power flow after line exchange

위와 같은 계통에서 배전선로 km을 통해서 부하 Pm을 복구한 후 배전선로의 조류의 수정은 복구된 선로에서 전력을 공급받는 쪽 즉, 상위 계통쪽으로 수정을 가하면 된다. 복구된 부하량을 Pm일 때 복구후의 선로의 조류를 P'(i)라고 하면

$$P'(km)=Pm \tag{4}$$

$$P'(k-i)=P(k-i)+Pm \quad i=0, 1, 2, \dots, n \tag{5}$$

위와 같은 식에 의해서 각 선로의 조류를 수정한다. 이는 개략적인 조류계산식이며 정확한 계산식은 참고문헌[2]의 조류계산식을 따른다.

3.4 알고리즘

본 논문에서 적용시킨 알고리즘은 그림 6과 같다.

4. 모의 결과 및 검증

다음과 같은 예제 시스템에 본 알고리즘을 적용시켰다.

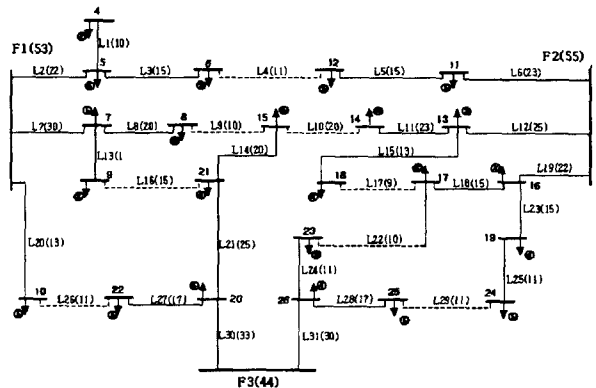


그림 7 예제 시스템
Fig. 7 sample system

그림 7의 계통은 정상상태에서 방사상으로 운전조건을 만족하고, 모든 계통의 제약조건을 만족하면서 운전되고 있다. 이러한 상태에서 배전선로 L30에서 사고가 발생하였다고 가정하여 보자.

배전선로 L30에서 고장 발생시 그 하위에 있는 시스템들은 전부 정전상태(긴급상태)에 들어가게 된다. 즉, 정상상태에서 배전선로 L30을 통해서 전력을 공급받던 N20, N21, N22, N15는 정전부하가 된다.

이들 부하를 복구하기 위해 다음과 같은 과정을 거친다.

- (1) 고장설비로 판명된 L30을 계통에서 분리
- (2) 정전구역으로 판명된 영역의 모든 스위치 Off
-스위치 L14, L21, L27, L30(고장선로) : Open
- (3) 정전구역판별 : N20, N21, N22, N15

그 후 단계(2)에서 Off된 선로들 중 여유용량이 가장 큰 선로를 찾아서 아래 표1과 같은 복구 절차를 거쳐 정전된 부하를 복구한다.

다음 표2는 앞서 서술한 방법으로 예제시스템에 상정사고를 고려하여 각각의 선로사고에 대해서 점중 최대조류법 및 퍼지추론과 비교한 것이다.

각 선로의 사고를 차례로 상정하여 점중 최대조류법[4]과 퍼지추론을 적용한 방법과 비교하였다. 그리고 제안한 방법의 공급지장모선 및 공급 지장량을 비교한 것이다.

표 1 30번 선로사고시 복구 절차

Table 1 Restorative procedure for the fault on line 30

STEP		여유용량		복구할 부하
		선로명	여유용량	
1단계	여유용량	26	6.9702	부하22 5[MW]
		16	4.92572	부하21 4[MW]
		10	8	부하15 5[MW]
		9	6	부하15 5[MW]
	복구조치	배전선로10이 선택됨 부하노드15의 5[MW]가 복구		
2단계	여유용량	26	6.9702	부하22 5[MW]
		16	4.92572	부하21 4[MW]
		14	3	부하21 4[MW]
	복구조치	배전선로26가(이) 선택됨 부하노드22의 5[kW]가 복구		
3단계	여유용량	27	2	부하20 5[MW]
		16	4.92572	부하21 4[MW]
		14	3	부하21 4[MW]
	복구조치	배전선로16이 선택됨 부하노드21의 4[MW]가 복구		
4단계	여유용량	27	2	부하20 5[MW]
	복구조치	21	1	부하20 5[MW]
		여유용량이 부족함 부하20[5MW]차단		

표 2에서 점증최대 조류법[5]과 비교해 보았을 때 21, 25번 선로의 고장의 경우 공급지장모선이 각각 21, 14에서 발생하였지만 제안한 방법에서는 정전부하가 모두 복구되었다. 또한 30번 선로 고장시 21번에서의 정전부하를 해소하지 못했지만 본 방법으로는 해소할 수 있었다.

퍼지추론과 비교 해 보았을 경우 23선로 고장시 퍼지추론을 이용한 방법은 공급지장이 발생하였지만 제안한 방법에서는 정전부하를 모두 해소했다.

위의 결과를 종합해 보면 점증최대 조류법이나 퍼지추론을 이용한 방법들이 해소하지 못한 정전부하를 본 방법을 통해서 해소할 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 배전 자동화의 한 부분인 선로자동화에서 선로의 용량제약조건 및 방사상 운전 조건을 고려하여 고장 복구 문제를 다루었다.

배전계통을 실제 하드웨어에 상응하도록 각각의 요소로 독립적으로 모델링하고 연결함으로써 배전계통의 표현을 용이하게 하였으며 복구과정에서 잦은 스위칭 작용에 따른 변경이 용이한 구조로 객체를 모델링하였다.

이렇게 구성된 객체를 이용해서 제안한 알고리즘과 기존의 점증최대 조류법 및 퍼지추론결과와 비교해 본 결과 두 방법에서 해소하지 못한 정전부하가 해소될 수 있었다.

표 2 제안한 방법과 비교

Table 2 Comparison with proposed method an others

사고 선로	점증최대조류법[4]		퍼지추론[5]		제안한 방법	
	공급 지장 모선	공급 지장량 [MW]	공급 지장 모선	공급 지장량 [MW]	공급 지장 모선	공급 지장량 [MW]
2	4 5	2 4	4	2	4 5	2 4
7	7	5	7 9	6 8	8	10
20	-	-	-	-	-	-
23	-	-	11	4	-	-
25	14	8	13	2	-	-
30	20 21	4 1	20	3	20	3
31	25 26	6 4	25 26	6 4	25 26	6 4
1	4	2	4	2	4	2
21	21	1	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단 학술 연구 조성비에 의하여 지원되었음

참 고 문 헌

- [1] Kil-Yeong Song, Yong-Ha Kim, Buhm Lee, Jun-Min Cha, Jae-Yong Namkung, Seung-Weon Lee, "Emergency Service Restoration Algorithm Using Efficient Reconfiguration in Distribution System, Trans KIEE Vol. 44 No. 7, August, pp843-851
- [2] C. H. Castro, J. B. Bunch, T. M. Topka, "Generalized Algorithms for Distribution Feeder Deployment and Sectionalizing", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-99, No-2, 1980, pp549-557
- [3] D. W. Ross, T. Patton, A. I. Cohen, M. Carsen, "New Methods for Evaluating Distribution Automation and Control(DAC) System Benefits", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-100, 1981, pp2927-2986
- [4] 栗原夫 外, "2次系統の 供給信頼度評價 システムの 開發", 日本 電力中央研究所 研究報告 T91032, 平成4年
- [5] 今村 讓 外, "配電融通問題への ファジイ 推論의 適用", 日本電氣學會 論文誌 B, 113卷 5號, 平成5年
- [6] Feng-Chang Lu, Yuah-Yih Hsu, "Fuzzy Dynamic Programming Approach To Reactive Power/Voltage Control In A Distribution Substation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 2, May 1997, pp681-688
- [7] Lester H. Fink, Kan-Lee Liou, Chen-Ching Liu, "From Generic Restoration Actions To Specific Restoration Strategies", IEEE Transactions on Power System, Vol. 10, No. 2, May 1995, pp745-752
- [8] N. D. R. Sarma, Soumen Ghosh, K. S. Prakasa Rao,

Manda Srinvas, "Real Time Service Restoration In Distribution Networks-A Practical Approach", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, October 1994, pp2064-2069

저 자 소 개



김 정 년(金 定 年)

1969년 2월 21일 생. 1994년 경북대 전기 공학과 졸업. 1996년 동 대학원 석사과정 졸업. 1998년 동 대학원 박사과정 수료. 1998년~현재 LG전선(주) 전력연구소 주임 연구원



백 영 식(白 榮 植)

1950년 7월 8일 생. 1974년 서울대 공대 전기공학과 졸업 1977년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사) 1984년 동 대학원 전기 공학과 졸업(공박) 1977년 명지대 공대 전기공학과 조교수. 현재 경북대 전자전기공학부 교수

Tel : 053-950-5602 Fax : 053-950-6600

E-mail : ysbaek@bh.kyungpook.ac.kr