

배전 계통에서의 사고복구를 위한 전문가 시스템

최 병윤*, 김 세호**, 이윤섭**, 문 영현**
* 한전 기술 연구원, ** 연세 대학교

An Expert System for Fault Restoration in Distribution System

B. Y. Choi*, S. H. Kim**, Y. S. Lee**, Y. H. Moon**
*KEPCO Research Center, **Yonsei Univ.

Abstract

When load areas on a feeder are deenergized due to faults, operators need to identify neighboring feeders, try to restore customers and minimize out-of-service areas. These cases include knowledge of system states and various constraints such as voltage drop. This paper concerns the load transfer in fault restoration. Also, it is considered the operating constraints such as line current capacity, relay trip current, transformer capacity, voltage drop and line loss. The expert system is able to propose the optimal load transfer method by analyzing system states and considering constraints.

1. 서론

일반적으로 전력계통에서는 계통사고에 광범위한 정전구역이 발생되면 사고구간을 제외한 건전구간을 주위의 타 FEEDER로 부하를 절체하여 정전구역을 최소화하도록 운영하고 있으며, 이러한 문제는 계통의 구성 상태 인식과 전압강하를 포함한 여러 제약조건이 수반된다. 그러나 운전원이 계통운영을 효율적으로 처리하기에는 배전계통의 구성이 복잡하고 제약조건 검토에 상당한 시간이 요구되며, 기존의 수리적인 방법으로 처리하기에는 부적합한 논리적인 해석이 요구된다.

본 연구에서는 사고복구시에 부하절체 방안을 제시하는 전문가 시스템을 제안하였다. 부하절체에 수반되는 제한조건으로 선로의 허용전류, 보호기기의 TRIP 전류, 변압기 용량, 전압강하 및 선로손실을 고려하였고, 전문가 시스템이 계통을 추적하면서 이러한 제한조건을 필요에 따라 계산 또는 판단함으로써 최적 부하절체 방안을 제시할 수 있도록 구성하였다.

2. 사고 복구 전문가 시스템의 구성

지금까지의 배전계통의 운용은 주로 운전원이 계통도를 보면서 필요한 수리적인 계산과 경험적 판단하에 이루어져 왔으며 계통사고시에는 교장수리 작업시간동안 사고 구간을 제외한 구간을 인근 타 FEEDER로 부하절체를 수행하여야 한다.

이러한 부하절체는 수리적인 문제보다는 계통의 구성을 판단하여 부하절체 방안을 제시하는 논리적인 사고가 더욱 요구되고 있다.

그림 1은 본 연구에서 제시하는 사고복구를 위한 전문가 시스템의 기본 구성도이다.

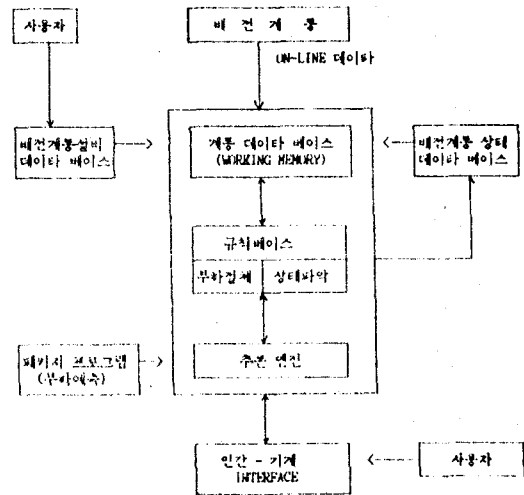


그림 1. 전문가 시스템 기본 구성도

본 연구에서는 각 변전소의 FEEDER 전류와 전압은 on-Line 데이터로 보선사령실에 전송되어 컴퓨터에 연결되며, 사고복구시 사고구간은 이미 확인되었다고 가정한다.

3. 지식 베이스

3.1 데이터 베이스

배전계통을 구성하는 기본요소인 데이터베이스는 계통을 구성하는 기본단위를 선로 및 개폐기로 구분하고, 구간선로의 명칭은 양단 개폐기를 LIST로 구성하였다. 또한 구간선로의 상태 정보는 선로의 전전속과 부하속을 구분하여 공급 FEEDER 명을 포함하도록 하였으며, 이 정보는 자동적으로 계통 상태 파악 규칙에 의하여 데이터가 입력되도록 구성하였다.

데이터베이스의 종류는 Substation, Substation Bus, Main Transformer, Substation Breaker, Power Line, Power Breaker 의 6가지로 구분하였으며 그 중 대표적인 Power Line과 Power Breaker 의 예를 들면 다음과 같다.

- (1) 구간선로(Power Line)

pow_line ([양단 개폐기명], 상선종, 중성선 선종, 배전방식 따른 상수, 완급규격, 공장, 구간부하설비 합계, 정상상태, 정상상태정보, 고장여부, 현 상태, 현상태 정보, 구간전류)

정상(또는 현)상태정보 : [선로의 전원측 개폐기 정보, 선로의 부하측 개폐기 정보]

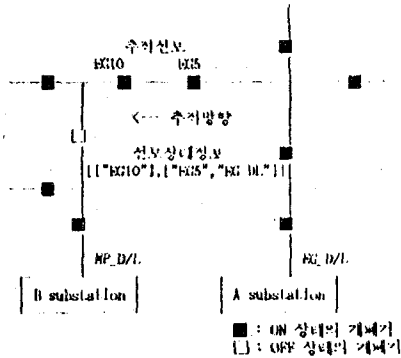
(2) 개폐기 또는 분기 및 말단 전주(Power Breaker)

pow_brk (개폐기명, 북성, 종류, 형식, 차단용량, PHASE TRIP 전류, GROUND TRIP전류, 개폐기의 담당부하전류, 자동 동작 여부, 정상상태, 고장여부, 현상태)

3.2 기본적인 계통 운용 규칙 베이스

선로 추적 방식

배전계통은 송전계통과는 달리 계통의 구성이 복잡하고 선로와 개폐기 상태가 수시로 변경되므로 이러한 문제에 적용 하면서 계통을 해석하기 위하여 본 연구에서는 인간이 계통 도를 보면서 계통의 흐름을 인식하는 방법으로 선로나 개폐기를 추적함으로써 전문가 시스템이 계통의 상태를 스스로 판단할 수 있도록 지식 베이스를 구성하였으며 다음은 선로를 추적하는 예이다.



a. 선로의 추적은 선로양단에 연결된 개폐기중 부하측 개폐기 방향으로 추적을 하면서 추적 선로에 대한 선로 상태 정보를 추출하고 추적 선로의 부하측 개폐기 방향으로 추적 중단조건을 만날때까지 계속 추적한다.

b. 다음과 같은 조건을 만나면 추적을 중단한다.

- OFF상태의 개폐기를 만날 때
- 선로의 말단을 만날 때
- D/L개폐기를 만날 때

위에서 제시한 선로추적 방식을 사용하여 전문가 시스템은 계통 운용을 위한 적절한 대책을 제시하여야 한다. 그러나 대책을 제시하기 위해서는 필요할 때마다 선로나 개폐기의 추적을 계속 반복하여야 하므로 전문가 시스템이 방안을 제시하는 데에는 시간을 요하는 경우가 많다. 따라서 계통의 구성 자체가 바뀌지 않는 한 미리 필요한 정보들 데이터 베이스화하여 필요시마다 사용할 수 있다면 시간적으로 상당한 효과를 가져올 수 있다. 따라서 본 연구에서는 D/L 별로 계통 운용시에 필요한 정보를 미리 추출하여 전문가 시스템이 신속하게 대안을 제시할 수 있도록 구성하고 있다.

1) 선로 상태 추적 규칙

일반적으로 선로의 가압여부및 전류의 방향은 배전 계통의 구성방법과 개폐기의 조작등에 의해 결정된다. 따라서 이리

한 데이터는 외부조건에 따라 자동적으로 결정되도록 구성하는것이 바람직하다.

구성의 특징은 선로와 개폐기의 연결상태를 추적하여 선로의 가압여부 및 공급전원을 찾아서 데이터 베이스를 자동으로 수정하도록 구성하였으며, 변전소 내부의 계통구성도 고려함으로써 변전소 사고시의 부하집중에도 적용할 수 있는 장점을 지니고 있다.

선로 상태를 파악하는 규칙은 다음과 같다.

RULE 1) 변전소 내부의 변압기 가압여부와 구내 OCB 등 개폐기 조작 상태를 추적하여 각 FEEDER가 가압되어 있는 지를 판단하고 데이터베이스에 입력한다.

RULE 2) D/L로 부터 선로추적 방식에 따라 선로를 추적하면서 전원의 공급방향에 관한 정보를 추출해 낸다.

RULE 3) 추출된 선로 상태 정보를 검토하여 선로의 상태를 추적한다.

- 어느 1지소만이 가압된 FEEDER를 만나면 선로는 HOT상태이다.

- 2개소 이상의 가압된 FEEDER를 만나면 선로는 LOOP상태이다.

- 1개소도 가압된 FEEDER를 만나지 않으면 선로는 DEAD상태이다.

2) 개폐기 조작에 따른 선로 상태 변화 규칙

배전 계통에서는 기기 또는 개폐기의 상태가 수시로 변화하므로 개폐기의 상태가 변화하면 변경된 사항에 적응하는 새로운 상태를 추적해야한다.

RULE1) 현재 선로의 상태가 HOT(LOOP)이고 조작된 개폐기의 상태가 ON -> OFF (OFF -> ON) 로 변화하면 조작된 개폐기로부터 부하측 방향의 모든 선로는 DEAD(HOT)상태이다.

RULE2) 현재 선로의 상태가 LOOP(HOT)이고 조작된 개폐기의 상태가 ON -> OFF (OFF -> ON)로 변화하면 조작된 개폐기로부터 부하측 방향의 모든 선로는 HOT(LOOP)상태이다.

RULE3) 현재 선로의 상태가 HOT이고 변전소의 OCB가 차단되면 해당 FEEDER에서 공급하는 모든 선로는 DEAD상태이다.

3) 선로의 구간별 전류를 할당하는 규칙

배전계통을 적절히 해석하기 위해서는 선로의 어느 위치에 서도 전류 및 전압을 파악하여야 하는데, 이를 위하여 각 위치에 센서를 설치하여 ON-LINE 으로 데이터를 처리하기에는 경제성이 없으므로 본 연구에서는 변전소의 각 FEEDER전류와 전압을 ON-LINE 으로 처리하고 매시간마다 FEEDER 전류를 각 구간별 설비데이터를 기준으로 비례분하여 할당하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$I_E = I_F \times \frac{L_i}{L_{sum}} \quad L_{sum} = \sum_F L_i$$

I_E : 구간선로에서 부하에 공급하는 추정전류 [A]

I_F : FEEDER의 공급전류[A]

L_{sum} : 해당 FEEDER 에 연결된 구간선로의 설비부하 총계 [KVA]

L_i : 구간선로의 설비부하 총계[KVA]

F : 해당 FEEDER에서 공급하는 구간선로

4) 전압강하 및 손실을 파악하는 규칙

$$V_{DROP} = K1 \times I_{avr} \times Z \times L_{eng}$$

V_{DROP} : 구간 선로의 선간 전압강하 [V]

$K1$: 배전방식에 따라 결정되는 상수

$$K1 = 2 \text{ (단상 2 선식)}$$

$$= 1 \text{ (3상 4 선식)}$$

Z : 장주법 임피던스 [Ω /Km] ($Z = R + jX$)

L_{eng} : 선로 공장 [Km]

I_{avr} : 구간 선로의 평균 전류 [A]

부하를 균등부하로 가정하여 산출한다.

$$= (\text{유입전류} + \text{유출전류}) / 2$$

$$V_{LOSS} = \sum_P (K2 \times I_{avr} \times Z \times L_{eng})$$

V_{LOSS} : FEEDER 에서 공급하는 선구간 선로의 손실 누계 [VA]

$K2$: 손실 계산에서 배전 방식에 의해 결정되는 상수

$$K2 = 2 \text{ (단상 2 선식)}$$

$$= 3 \text{ (3상 4 선식)}$$

F : FEEDER 가 담당하는 선로

3.3 사고 복구를 위한 부하절체 규칙베이스

1) 1회 부하 절체 방안 추적 규칙

배전계통의 부하절체 방안을 도출하기 위해서는 계통의 흐름을 정확히 인식하여야 하며, 원하는 정전구역이 정해지면 계통상의 부하절체가 가능한 개폐기를 계통도에서 전부 찾아서 절체시에 발생하는 모든 문제점을 검토하여야 한다.

본 연구에서는 추적 규칙을 통하여 부하절체 방안을 찾는 새로운 형태의 규칙베이스를 개발하였으며, 이 방법은 다중 정전구역이 발생하여도 선로 상호간 미치는 계통 흐름상의 영향을 고려하여 다각적인 부하절체 방안을 제시할 수 있는 장점을 지니고 있다.

다음은 부하절체 방안을 도출하는 규칙베이스의 예이다.

- 원하는 정전구역의 중단 개폐기 (정전구역을 표시하는 개폐기)를 모두 차단한다.
- 정전구역의 개폐기 중 전원측에 연결되어 있는 개폐기는 부하절체가 불필요하며 우선 복구구간에 해당한다.
- 이미 데이터 베이스화된 FEEDER 정보를 이용하여 절체 가능 개폐기를 파악한다.
- 정전구역의 부하측 개폐기마다 절체할 부하량을 계산한다.
- 각 절체 개폐기마다 그 방향으로의 절체 전과 후의 전압강하 및 손실을 계산한다.

2) 제한조건 검토 규칙

부하절체 방안 검토시 제한조건중 필수조건으로 선로의 허용전류, 보호기기의 TRIP 전류, 변압기 용량을 고려하였고 선택조건으로는 전압강하와 손실을 포함하였다.

다음은 제한조건 검토 RULE의 예시이다.

- 부하절체후 최대부하전류는 선로의 허용전류, 보호기기의 TRIP 전류, 주변압기 용량을 초과하지 않아야 된다.
- 1회 절체방안 모두 필수 조건을 만족하지 않으면 2회 절체방안을 검토한다.
- 여러 부하절체 방안 중 10% 이내의 전압강하와 손실이 가장 적은 방안을 선택한다.

3) 2회 이상 절체방안 추적 규칙

배전계통에서 1회 절체방안이 필수조건을 만족하지 못하면 2회 이상 절체 방안을 검토하여야 한다. 지금까지 제안된 방법은 임의의 한 절체 개폐기를 선정하여 가능한 부하 만큼의 절체구간을 우선 넘겨주고 잔여 절체부하는 나머지 절체개폐기가 감당하도록 구성하였으나, 이는 처음 기준이 되는 절체개폐기 선정에 따라 평가지표가 달라지므로 최적의 부하절체 방안을 제시하는데는 문제점이 있어왔다.

본 연구에서는 부하측 정전구간 개폐기와 각 절체 개폐기 사이의 모든 개폐기를 2회 절체 본거점으로 가정하여 각각의 모든 경우에 대하여 필수조건과 선택조건을 검토함으로써 최적의 부하절체 방안을 제시할 수 있도록 구성하였다. 사고 복구를 위한 부하절체의 전체적인 흐름도를 그림 2에 표시하였다.

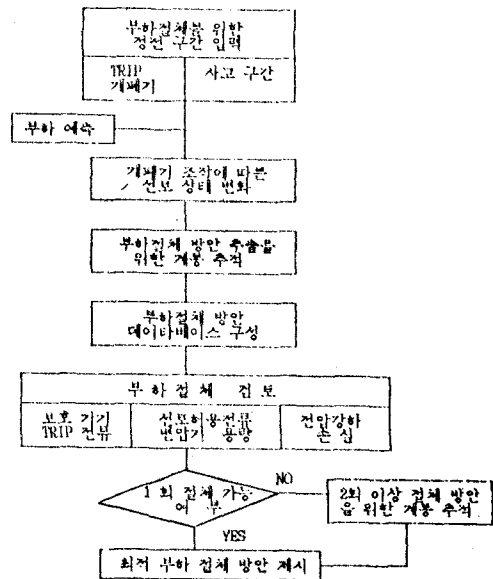


그림 2. 최적 부하절체 전문가 시스템 흐름도

4. 사례 연구 및 결과 고찰

본 연구에서 제안한 방법의 효용성을 입증하기 위해서 한 전 서부지점 계통을 기초로 모델계통을 구성하여 전문가 시스템을 적용하였다. 적용사례는 선로사고와 변전소사고를 고려하였으며, 각 경우마다 제시하는 부하절체 방안을 우선순위 순서로 제시함으로써 운영원이 현장 여건을 고려하여 선택할 수 있도록 하였다. 그림 3은 사례연구를 위한 모델 계통도이다.

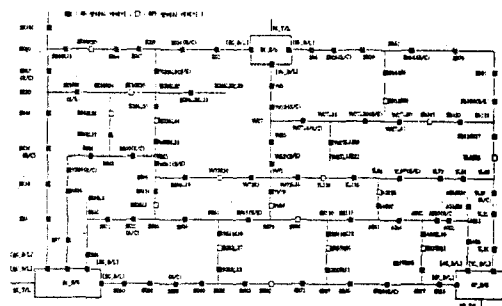


그림 3. 모델 계통도

(사례1) 사고가 BS19 와 BS22 사이에서 발생하여 BS16 RECLOSER 가 차단되었을 때 사고복구 동안 사고시간을 제외한 DEAD 선로를 타 FEEDER로 절체하는 방안을 전문가 시스템은 다음과 같이 제시하였다.

결과 :

- 1) BS16 와 BS19 사이의 절체 방안은
 - BS19 를 절분하고 BS16 을 투입하여 BS_D/L로 절체
- 2) BS22 이후의 절체 방안은
 - BS22를 절분하고 SS211L8을 투입하여 SS_D/L로 절체 또는
 - " " 을 투입하여 EG_D/L로 절체 또는
 - " " 을 투입하여 YW_D/L로 절체 또는
 - " " 을 투입하여 SK_D/L로 절체

위의 결과 1)은 정전구간을 사고전에 공급하였던 동일한 FEEDER로 공급할 수 있으므로 제한조건을 검토할 필요가 없이 반드시 수행하여야 하는 전진속 절체방안이며, 결과 2)의 부하속 절체방안은 위의 4가지 방안 가운데 제한 조건을 검토하여 최적 절체방안을 제시하여야 한다. 표 1은 부하속 절체방안을 검토한 결과이며, 최적 부하절체 방안은 SS211L8 개폐기를 통하여 SS_D/L로 절체하는 방안이다. 여기서 BS32L10 개폐기를 통한 절체방안은 최대 부하전류가 SK18 RECLOSER의 TRIP전류를 초과하므로 절체가 불가능하다.

무선 순위	절체 방안 (절체 FEEDER)	선로의 허용전류	보호기기 TRIP전류	변압기 용량	최대전압 강하 (V)	손실 (KVA)
1	SS211L8 ON (SS_D/L)	PASS	PASS	PASS	79.33	26.79
2	EG12L31 ON (EG_D/L)	PASS	PASS	PASS	99.09	38.34
3	YW72R10 ON (YW_D/L)	PASS	PASS	PASS	112.58	77.70
4	BS32L10 ON (SK_D/L)	PASS	NONPASS	PASS	148.84	91.81

표 1 부하절체 제한조건 검토표

(사례2) 변전소 내의 주 변압기 사고나 보수작업시 해당 변압기에서 공급하는 모든 FEEDER를 타 FEEDER로 부하절체 하여야 하는 경우가 발생된다. 이 경우는 절체하는 부하가 크고 한 FEEDER의 절체방안이 다른 FEEDER에도 영향을 주므로 다양한 검토가 필요하다.

시뮬레이션을 위한 주 변압기 사고는 DK 변전소 전체로 하였으며 다음은 전문가 시스템이 제시하는 절체방안이다.

결과 :

- 1) EG_D/L 전체의 부하절체 방안은
 - EG_D/L OCB를 절분하고 SK80R8을 투입하여 SK_D/L로 절체
 - " " 을 투입하여 SK_D/L로 절체
 - " " 을 투입하여 BS_D/L로 절체
- 2) YW_D/L 전체의 부하절체 방안은
 - YW_D/L OCB를 절분하고 YW72R20을 투입하여 BS_D/L로 절체
 - " " 을 투입하여 SS_D/L로 절체
- 3) SB_D/L 전체의 부하절체 방안은
 - SB_D/L OCB를 절분하고 SB90R50을 투입하여 YL_D/L로 절체

5. 결 론

본 연구에서는 배전계통의 운용에 있어서 계통 사고시에 필수적으로 수반되는 부하절체에 관한 전문가 시스템을 개발하였다. 이 전문가 시스템은 계통의 구성을 인식하는 방법을 규칙베이스로 구성하여 계통의 변경이나 개폐기 조작시에도 적용할 수 있도록 하였으며, 부하절체 방안을 제시하는 새로운 규칙베이스를 개발함으로써 다중 정전 작업시에도 복합적인 여러 상황을 판단하여 최적의 부하절체 방안을 제시할 수 있도록 하였다. 또한 여러가지의 절체 방안이 도출되면 각 방안에 대한 필수조건인 선로의 허용전류와 보호기기의 TRIP전류 그리고 변압기 용량을 검토하여 절체가 가능한 지를 검토하고, 필수조건이 만족되면 전압강하와 손실을 계산하여 최적의 절체 방안을 선택 제시할 수 있으므로 계통운용을 효율적으로 수행할 수 있다.

본 연구에서는 주로 계통 사고나 정전작업시에 수행하는 부하절체를 고려하였으나 배전계통의 최적 운용을 위한 FEEDER 재구성에서 수행되는 부하절체도 개발된 전문가 시스템을 응용할 수 있는 바, 지속적인 관련 연구를 추진할 예정이다.

Reference

[1] Chen-Ching Liu, Seung Jae Lee, S.S. Venkata, "An Expert System Operational Aid for Restoration and Loss Reduction of Distribution System.", IEEE Trans. Power System, vol. 3, No. 2, May 1988.

[2] S. Civanlar, J. J. Grainger, Ho Yin, S. S. H. Lee, "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction" IEEE Trans. Power Delivery, vol. 3, No. 3, July 1988.

[3] Chen-Ching Liu, Kevin Tomsovic, "An Expert System Decision-making of Reactive Power/Voltage Control.", IEEE Trans. Power System, vol. PWR5-1, No. 3, August 1986.

[4] 김 운동, 최 병운, 문 영현, 송 경빈, "배전 계통 선로 상태 파악을 위한 전문가 시스템", 전기학회 추계학술대회, 1988.