

정전구역 해소를 위한 전문가 시스템 연구

박 영문 윤 재승* 이 광호
서울대학교 전기공학과

A Study on Expert System for Power System Restoration

Young-Moon Park Jae-Seung Yoon Kwang-Ho Lee
Seoul National University

ABSTRACT

This paper introduces an expert system for the automation of power system restoration. We focus on following two points : a) Data Structure which can describe power system and ensure the efficient search and b) Restoration Strategy which performs faster black-out restoration with fewer switching operations and overload alleviation using sensitivity. Some examples are used to illustrate the capabilities of the proposed expert system.

1. 서론.

현대사회에서 전력 수요의 지속적인 증가와 함께 전력 계통은 점점 더 대형화하고 복잡해지고 있다. 이러한 상황에서 전력 계통에서의 사고는 사회적으로 큰 영향을 미칠 수 있고, 따라서 계통의 안정도와 신뢰도를 높이기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 그럼에도 불구하고 전력 계통에 상존하는 사고의 가능성은 배제할 수 없으므로, 사고 후의 신속한 복구에 대한 연구 역시 중요한 의의를 지니고 있다.

본 논문에서는 정전구역 복구의 자동화를 위해 전문가 시스템을 이용하였다. 전력 계통의 모든 요소들을 Cell이라는 기본 단위로 정의하고, 그 위에 계층 구조를 가진 Subsystem 들을 정의함으로써 대상이 되는 계통을 표현한다. Subsystem 은 차단기의 개폐 상태에 따라 변화하며, 이를 통해 계통상에 사고로 인해 발생한 정전구역을 쉽게 인식하게 된다. 인식되어진 정전구역의 복구는 계층구조를 이용하여 차단기의 개폐동작을 최소화하는 방향으로 이루어진다. 정전 구역 복구의 중요한 과정 중 하나는 복구 작업을 수행할 때 차단기의 개폐 동작으로 인해 발생할 수 있는 선로의 과부하를 해소하는 것이다. 이를 위해 본 논문에서는 차단기의 개폐 동작시에 감도를 이용해 과부하를 예측하고 해소하는 방법을 사용하였다.

정전구역 복구의 문제는 전문가의 경험적 지식과 복잡한 산술적 계산이 필요하며[1], 이의 신속한 해결을 위해서는 사고가 발생하기 전에 대상 계통에 대한 분석과 사고에 대한 대응책을 마련해야 한다[2,3]. 대부분의 정전구역 복구에 대한 연구는 전문가의 경험적 지식을 효율적으로 표현하는데 큰 비중을 두고있으며[4,5,6], 과부하 해소의 문제 역시 관심의 대상이다[7].

2. 전력 계통의 표현.

2.1 Cell.

Cell이란 전력 계통을 구성하는 모선, 선로, 발전기, 부하, 변압기와 같은 기본 요소로 정의되어진다. 각각의 Cell은 그 Cell의 Type에 따라 각각 다른 Data를 가지고 있다. Cell의 표현은 2.3에서 다룬다.

2.2 차단기(CB)

1) CB에 대한 표현식은 다음과 같다.

CB(INDEX, CELL₁, CELL₂, STATUS)

가) INDEX : CB에 지정된 CB의 이름이다.

나) CELL₁, CELL₂ : CB가 연결하고 있는 두개의 Cell이다. 하나의 CB는 반드시 두개의 Cell을 연결한다.

다) STATUS : CB의 개폐 상태이다.

2) CB는 외부 CB와 내부 CB로 분리할 수 있다.

가) 외부 CB : 어떤 Subsystem이 외부의 다른 Subsystem과 공유하고 있는 CB이다.

나) 내부 CB : 상위 Subsystem이 포함하고있는 하위 Subsystem들의 모든 외부 CB를 상위 Subsystem의 내부 CB라고 한다.

2.3 Subsystem.

하나의 Subsystem이란 Cell이나 다른 Subsystem으로 정의되어진다. Subsystem의 기본적인 표현은 다음과 같다.

SUB(INDEX, TYPE, [INTERNAL SUBSYSTEM LIST], [EXTERNAL CB LIST], [DATA])

1) INDEX : Subsystem에 지정된 이름이다.

2) TYPE : Subsystem의 Type으로 모선, 선로, 발전기, 부하, 변압기, Subsystem으로 분류되어진다. TYPE이 Subsystem이 아닌 경우는 Cell이 된다.

3) INTERNAL SUBSYSTEM LIST(ISL) : 현재의 Subsystem을 구성하고 있는 하위 Subsystem의 Index로 구성되어진 List이다. Cell인 경우는 빈 List를 가진다.

4) EXTERNAL CB LIST(ECL) : Subsystem이 가지고 있는 외부 CB의 Index로 이루어진 List이다.

5) DATA : Subsystem의 TYPE에 따라 각각 다음과 같은 Data를 가진다.

가) 발전기 : P_g, Q_g, Q_{g_min}, Q_{g_max}, P_{g_limit}.

나) 부하 : P_L, Q_L.

다) 모선 : V, θ, ΔV, Δθ.

라) 선로 : R, X, hc, Pi, Pi_limit.

마) 변압기 : Tap, Pt, Pt_limit.

바) Sub_system : ΣP_g, ΣQ_g, ΣQ_{g_min}, ΣQ_{g_max}, ΣP_L, ΣQ_L.

2.4 CB 상태의 변화에 따른 Subsystem의 변화.

1) CB가 on에서 off로 바뀌는 경우.

어떤 CB의 Status가 on에서 off로 바뀌었을 때 처리는 다음과 같다.

가) 상태가 바뀐 CB를 Internal CB로 가지는 Subsystem을 최상위 Subsystem으로부터 하위 Subsystem으로 찾아간다.

나) 찾아진 Subsystem에 대해 Subsystem의 분리가 일어나는 가검사한다. 분리가 일어나지 않으면 처리는 끝난다.

다) 분리가 일어나는 경우 2개의 새로운 Subsystem이 생성되고, 분리가 일어난 Subsystem이 속한 상위 Subsystem의 ISL에 새로 생성된 2개의 Subsystem의 Index가 추가되며, 원래의 Subsystem의 Index는 삭제된다.

라) 삭제되어진 Subsystem이 속한 상위의 Subsystem에 대해 반복적으로 나), 다)의 과정을 수행한다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

2) CB가 off에서 on으로 바뀌는 경우.

CB의 Status가 off에서 on으로 바뀔 때, Subsystem의 구조에 변형이 있기 위해서는 그 CB가 최상위 Subsystem의 외부 CB인 경우 뿐이다. 이 경우 해당 CB를 공유하고 있는 두개의 최상위 Subsystem의 Index를 ISL에 가지는 새로운 최상위 Subsystem이 생성된다.

3. 정전 구역의 복구.

3.1 고장 구간 분리.

전력 계통에 사고가 발생했을 경우 사고가 난 부분을 우선적으로 계통에서 분리해내야 한다. 고장구간의 분리는 사고가 발생한 Cell을 찾아 그 Cell의 모든 외부 CB를 off시킴으로써 이루어진다.

3.2 정전구역 및 전력 계통 상태 인식.

정전구역을 포함한 전력 계통 상태의 인식은 최상위 Subsystem을 통하여 이루어지며, 최상위 Subsystem의 상태는 ΣP_g , ΣP_L 의 값에 따라 다음과 같이 분류된다.

- 1) 정전상태 : $\Sigma P_g = 0$, $\Sigma P_L \neq 0$ 인 최상위 Subsystem.
- 2) 부족상태 : $\Sigma P_g \neq 0$, $\Sigma P_g < \Sigma P_L$ 인 최상위 Subsystem.
- 3) 과잉상태 : $\Sigma P_g > \Sigma P_L$ 인 최상위 Subsystem.

3.3 전력의 수급조건 만족.

우선 선로의 과부하는 고려하지 않고, 정전상태와 부족상태 Subsystem에 대해 전력의 수급조건이 만족될 수 있도록 전력을 공급해 줄 수 있는 과잉상태 Subsystem으로의 경로를 찾는다. 처리 순서는 다음과 같다.

- 1) 정전상태 Subsystem의 외부 CB를 통해 연결될 수 있는 과잉상태 Subsystem들을 선택한다.
- 2) 선택되어진 과잉상태 Subsystem 중 그 전력의 잉여 양이 가장 큰 과잉상태 Subsystem을 최종적으로 선택한다.
- 3) 정전상태 Subsystem과 선택되어진 과잉상태 Subsystem이 공유하는 외부 CB를 on하여 두 Subsystem을 하나의 Subsystem으로 합성한다.
- 4) 변화되어진 계통의 구성상태 및 전력수급상황을 인식하여 정전상태가 남아있으면 1), 2), 3)의 과정을 반복한다.
- 5) 정전상태 Subsystem에 대한 수급조건이 고령이 끝나면 1), 2), 3), 4)의 과정이 부족상태 Subsystem에 대하여 반복된다.

3.4 과부하의 해소.

3.3의 과정이 끝나면 전체 계통의 전력수급조건은 만족되므로 조류계산을 풀어 과부하 여부를 검사한다. 만일 과부하가 발생하면 과부하를 해소하기 위해 현재 연결되어 있지 않은 선로의 우선순위를 고려해서 투입해 나간다. 선로를 투입함으로써 과부하의 해소 여부는 감도를 통해 선로조류를 예측함으로써 이루어진다.

1) 감도(Sensitivity).

i, j 모선 사이에 선로가 투입되는 경우를 가정한다. 선로가 투입되기 전에 i 모선의 전력수급방정식은

$$F_i(Y_i, V, \theta) = S_i - V_i \sum_j Y_{ij} V_j \exp(-j\theta_{ij}) = 0$$

여기서, S_i 는 i 모선의 주입전력.

$$\begin{aligned} Y_i &= [Y_{i1}, \dots, Y_{in}]^T \\ &: Y_{ij} \text{ 는 } Y \text{ 어드미턴스 행렬의 } ij \text{ 원소.} \\ V &= [V_1, \dots, V_n]^T \\ &: V_i \text{ 는 } i \text{ 모선의 전압.} \\ \theta &= [\theta_1, \dots, \theta_n]^T \\ &: \theta_i \text{ 는 } i \text{ 모선의 위상각.} \\ \theta_{ij} &= \theta_i - \theta_j. \end{aligned}$$

Jacobian 행렬은 다음과 같다.

i, j 모선 사이에 선로가 투입된 후 i 모선의 전력수급방정식은

$$\begin{aligned} F_i(Y_i + \Delta Y_i, V + \Delta V, \theta + \Delta \theta) &\text{ 이 되고, 이를 Taylor 전개하면,} \\ F_i(Y_i + \Delta Y_i, V + \Delta V, \theta + \Delta \theta) &= F_i(Y_i, V, \theta) + \\ &(\partial F_i / \partial Y_i)^T \Delta Y_i + (\partial F_i / \partial V)^T \Delta V + (\partial F_i / \partial \theta)^T \Delta \theta + \\ &\Delta Y_i^T (\partial^2 F_i / \partial Y_i \partial V) \Delta V + \Delta Y_i^T (\partial^2 F_i / \partial Y_i \partial \theta) \Delta \theta \text{ 이다.} \\ F_i(Y_i, V, \theta) &= 0 \text{ 이므로,} \\ F_i(Y_i + \Delta Y_i, V + \Delta V, \theta + \Delta \theta) &= \\ &(\partial F_i / \partial Y_i)^T \Delta Y_i + (\partial F_i / \partial V)^T \Delta V + (\partial F_i / \partial \theta)^T \Delta \theta + \\ &\Delta Y_i^T (\partial^2 F_i / \partial Y_i \partial V) \Delta V + \Delta Y_i^T (\partial^2 F_i / \partial Y_i \partial \theta) \Delta \theta. \end{aligned} \quad (1)$$

(1) 식의 허수부를 취해 정리하면,

$$\Delta Q' = [M + \Delta M] \Delta \theta + [L + \Delta L] \Delta V, \quad (2)$$

(2)식에서 ΔM , ΔL 은 ii, ij, ji, jj원소를 제외한 모든 원소의 값은 0이고, $\Delta Q' = [0 \cdot 0 \cdot 0 \Delta Q_i' \ 0 \cdot 0 \cdot 0 \Delta Q_j' \ 0 \cdot 0 \cdot 0]$ 가 되며, $\Delta Q_i'$, $\Delta Q_j'$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta Q_i' &= V_i V_j \operatorname{Im}[\Delta Y_{ij}] + \\ &V_i V_j (\operatorname{Im}[\Delta Y_{ij}] \cos \theta_{ij} - \operatorname{Re}[\Delta Y_{ij}] \sin \theta_{ij}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_j' &= V_j V_i \operatorname{Im}[\Delta Y_{jj}] + \\ &V_j V_i (\operatorname{Im}[\Delta Y_{ji}] \cos \theta_{ji} - \operatorname{Re}[\Delta Y_{ji}] \sin \theta_{ji}). \end{aligned}$$

$\operatorname{Re}[s]$: s의 실수부를 표시한다.

$\operatorname{Im}[s]$: s의 허수부를 표시한다.

(1) 식의 실수부를 취해 정리하면,

$$\Delta P' = [H + \Delta H] \Delta \theta + [N + \Delta N] \Delta V, \quad (3)$$

(3)식에서 ΔH , ΔN 은 ii, ij, ji, jj원소를 제외한 모든 원소의 값은 0이고, $\Delta P' = [0 \cdot 0 \cdot 0 \Delta P_i' \ 0 \cdot 0 \cdot 0 \Delta P_j' \ 0 \cdot 0 \cdot 0]$ 가 되며, $\Delta P_i'$, $\Delta P_j'$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta P_i' &= -V_i V_j \operatorname{Re}[\Delta Y_{ij}] - \\ &V_i V_j (\operatorname{Re}[\Delta Y_{ij}] \cos \theta_{ij} + \operatorname{Im}[\Delta Y_{ij}] \sin \theta_{ij}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_j' &= -V_j V_i \operatorname{Re}[\Delta Y_{jj}] - \\ &V_j V_i (\operatorname{Re}[\Delta Y_{ji}] \cos \theta_{ji} + \operatorname{Im}[\Delta Y_{ji}] \sin \theta_{ji}). \end{aligned}$$

(2) 식에서 $(M + \Delta M)$ 은 무시하면,

$$\begin{aligned} \Delta V &= [L + \Delta L]^{-1} \Delta Q' \text{ 가 되고, 이를 식 (3)에 대입하면,} \\ \Delta \theta &= [H + \Delta H]^{-1} \Delta P' - [N + \Delta N] [L + \Delta L]^{-1} \Delta Q' \text{ 으로 구해진다.} \end{aligned}$$

구해진 ΔV , $\Delta \theta$ 을 이용해 V, θ 를 갱신하여 선로 조류를 계산하고 과부하 여부를 예측한다.

2) 과부하 해소 순서.

가) 정전상태가 발생했던 Subsystem의 외부 CB중 그 Status가 off인 외부 CB들을 인식하여, 그 CB에 연결된 선로들을 찾는다.

나) 찾아진 선로들 중 그 선로 양단 모선의 전압을 고정시키고 계산한 선로 조류의 값이 가장 큰 선로를 선택한다.

다) 선택된 선로를 실제로 투입하고 감도를 이용해 과부하 해소 여부를 검사한다.

라) 위의 과정을 과부하가 모두 해소될 때까지 대상의 선로들에 대해서 반복한다.

마) 과부하 해소 실패시에는 해당 과부하 선로 주위의 연결되어 있지 않은 선로들을 대상으로 나) 다) 라)의 과정을 반복한다.

4. 사례 연구.

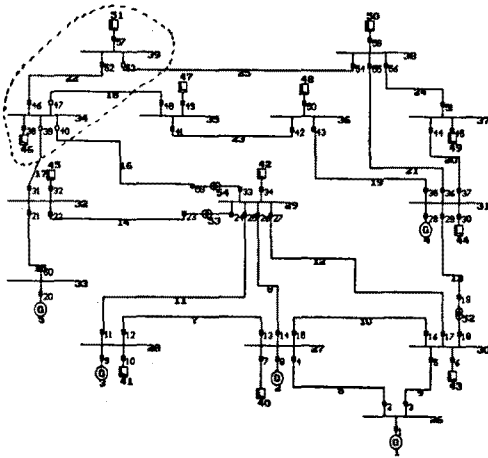
사례 연구의 대상은 IEEE 14모선 계통이다.

4.1

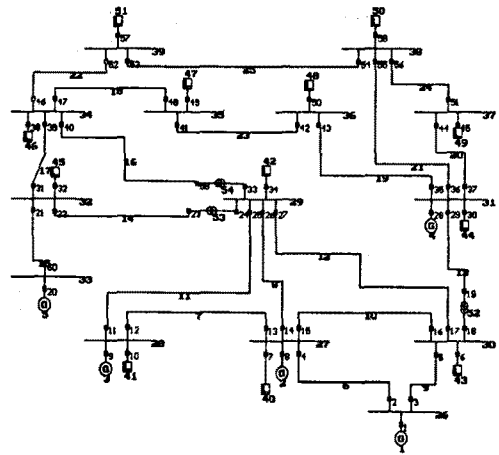
<그림 1.>은 18번 선로의 사고로 정전구역이 발생한 모습이다. 복구순서는 우선 사고가 발생한 18번 선로를 분리하고, 전력의 수급조건을 고려해서 가장 선로조류 용량이 큰 17번 선로가 투입됐다. 이외에 12, 17번 선로에 과부하가 발생했고, 이의 해소를 위해 연결되어있지 않은 16, 25번 선로의 우선 순위를 고려해서 25번 선로가 투입됐다. 감도에 의해 12, 17번 선로의 과부하가 해소되는 것으로 예측되어 복구작업은 끝난다. 복구 결과는 <그림 2.>와 같다.

4.2

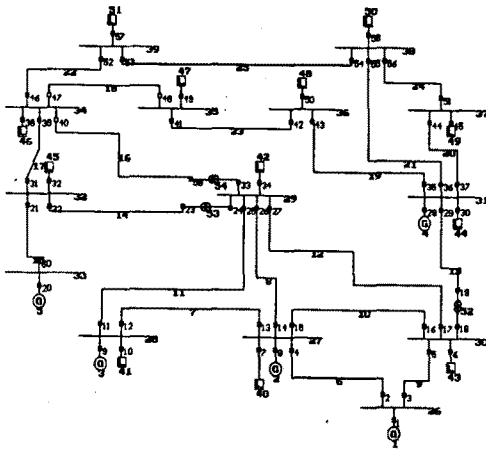
<그림 3.>은 22번 선로의 사고로 정전구역이 발생한 모습이며, 20번 선로는 예비선로로 끊어져 있다. 사고가 발생한 22번 선로를 분리하고, 정전구역의 복구를 위해 25번 선로가



< 그림 1. > 18번 선로의 고장으로 인해 정전구역이 발생한 계통도.

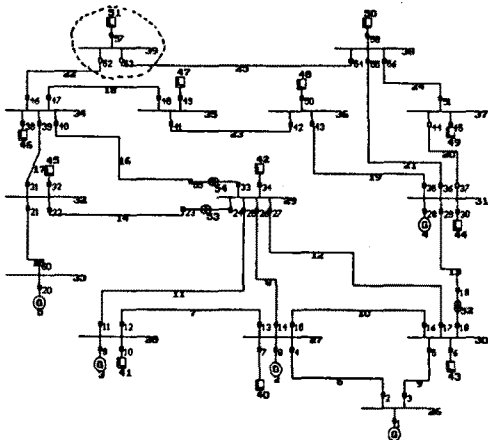


< 그림 4. > < 그림 3. >의 복구상태.



< 그림 2. > < 그림 1. >의 복구상태.

투입됐다. 그 결과 21번 선로에 과부하가 발생했고, 정전구역에 대해서는 더 이상 투입할 예비선로가 없으므로, 과부하가 발생한 21번 선로 주위의 예비선로를 찾는다. 이에의해 20번 선로가 투입되고, 감도에 의한 예측 결과 과부하가 해소되어 복구작업은 끝난다. 복구 결과는 <그림 4.>과 같다.



< 그림 3. > 22번 선로의 고장으로 인해 정전구역이 발생한 계통도.

5. 결론

본 논문에서는 전력 계통에 사고가 발생하여 정전구역이 발생했을 때, 차단기의 개폐상태를 통한 정전구역 복구의 자동화를 위해 전문가 시스템을 적용해 보았다. 전문가 시스템이 정전구역의 복구를 신속히 수행하기 위해서는 효율적인 탐색이 가능하도록 계통이 표현되어야 한다. 이에 본 논문에서는 Cell과 Subsystem을 이용한 계층구조로서 대상 계통을 표현하였다. 과부하 예측시 감도를 이용한 것은 처리속도를 향상시키기 위해서이고, 감도에 의한 선로 조류의 값은 실제 조류계산을 통해 얻은 값과 5%내외의 오차를 가진다. 본 논문에서 정전구역 복구시 사용된 Rule은 IEEE 14도선 계통의 모의 사고복구에 대해 만족할 만한 결과를 제시했다.

본 논문의 정전구역 복구 Rule에서는 예비 선로를 가정했고, 따라서 예비선로가 없을 경우의 복구 전략인 발전량 재분배나 부하차단에 대해서는 앞으로의 연구가 필요하다.

6. Reference

- [1] T.Sakaguchi and K.Matsumoto, "Development of a Knowledge Based System for Power System Restoration", IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-102, No.2, pp.320-329, Feb. 1983.
- [2] F.Wu and A.Monnticelli, "Analytical Tools for Power System Restoration - Conceptual Design", 86 WM105-1, IEEE PES Winter Meeting, New York, Feb. 1986.
- [3] R.J. Kafka, D.R.Penders, S.H.Bouchev and M.M.Adibi, "System Restoration Plan Development for a Metropolitan Electric System", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-100, No.8, pp.3703-3713, Aug. 1981.
- [4] 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. on Power Systems, Vol.3, No.2, pp.619-626, May. 1988.
- [5] Yukio Kojima, Shigeru Warashina, Masakazu Kato and Hadime Watanabe, "The Development of Power System Restoration Method for a Bulk Power System by Applying Knowledge Engineering Techniques", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.4, No. 3, August. 1989.
- [6] Shi-Mo Wang, Zhang-Zhuo Dong, Qi-Hong Sun and Dao-Zhi Xia, "An Expert System for Bulk Power System Restoration", Second Symposium on Expert Systems Application to Power Systems, Seattle, USA, July 17-20, 1989.
- [7] Naoki Kobayashi, Hiroshi Okamoto, Akihiko Yokoyama and Yasuji Sekine, "Power System Control Using Distributed and Hierarchical Problem Solving", Third Symposium on Expert Systems Application to Power Systems, Tokyo-Kobe, Japan, April 1-5, 1991.