

멀티에이전트 시스템을 이용한 배전계통 사고복구시스템에 관한 연구

정광호, 최연승, 이승재
 명지대학교 차세대전력기술연구센터

A study on Service Restoration Systems
 for Power Distribution Networks by Applying Multi-Agent System

K.H. Jung, M.S.Choi, S.J.Lee
 MyongJi University Next-Generation Power Technology Center

Abstract - A service restoration is one of the most important missions in distribution system operation. This paper proposes a multi-agent system approach to distribution system restoration. Every relay is developed as an agent by adding its own intelligent, self-tuning and communication ability. Relay agent calculates and corrects its restoration index by itself through communication with neighboring agents and its own intelligence. The proposed algorithm is applied to a simple network to show how to calculate restoration index.
Keywords : Multi-Agent System, Service Restoration, Distribution Networks

1. 서 론

최근 전력수요가 급증함에 따라 효과적인 관리를 통하여 배전 계통의 효율과 신뢰도를 향상시킬 수 있는 배전자동화의 필요성이 높아지고 있다. 배전자동화의 여러 기능들 중에서 정전복구는 매우 중요한 기능이다. 방사상으로 운영되고 있는 배전계통에서 정전복구기능은 적절한 Switching을 통해 계통의 Topology를 변경하여 부하를 절제 하는 방법으로 이루어지며 이때 백업 피더의 선정 및 Switching은 계통의 안정도와 신뢰도에 매우 큰 영향을 미치므로 이에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며[1-3] 배전선로에서 고장이 발생했을 때 정전구간을 연계선로로 절제 하는 방안의 수립은 개폐기 투입/개방 상태에 대한 조합최적화 문제로서 제한된 시간 내에 준최적해를 도출하기 위해 경험적 탐색방법을 사용하는 다양한 연구[4-6]가 진행되어 왔으며, 최근에는 배전선로 운영자의 경험적 지식을 활용하는 전문가 시스템의 적용에 대한 연구[7-9]가 수행되었다. 그러나 배전선로의 복구능력에 관해서는 선로의 분할 및 연계기준이나 적정 공급용량에 대한 연구만이 수행되었을 뿐 직접적으로 배전선로의 복구능력을 평가방법에 관한 연구는 찾아보기 어렵다. 현재 배전계통의 복구능력을 향상시키기 위한 방법으로는 대상선로의 부하량에 대한 연계선로의 공급 여유용량의 비를 크게 하거나[10] 부하를 균등하게 배분하는 간접적인 방법을 사용하고 있다.

배전자동화에는 정전복구기능 외에도 부하 균등화, 과부하 해소, 정전작업계획, 상불평해소와 같은 기능들이 적절한 Switching을 통한 계통의 Topology 변경을 통해 이루어지므로 기능적인 면에서는 서로 공통적인 부분이 많다. 따라서 정전복구시스템을 효과적으로 구현할 경우 다른 기능들의 구현 시 기존에 개발된 정전복구시스템의 일부를 그대로 사용할 수 있으므로 방대한 배전자동화시스템의 전체 개발에 필요한 시간 및 비용을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 멀티에이전트 시스템을 이용한 배전 계통 복구 시스템에서 사용되는 복구 지수와 계산 방법 그리고 개별 에이전트들이 가져야 할 정보에 대해서 설명한다.

2. 본 론

2.1 복구 지수(Restoration Index)

2.1.1. 직선 경로 부하 (DPL : Direct Path Load)

어떤 구간에서부터 상시연계점까지의 직선 경로 상에 있는 부하의 합계를 직선 경로 부하라고 정의하며, 구간 Z_i 에서 연계선로 F_j 까지의 직선경로부하를 $DPL_{i,j}$ 라고 표기한다. 그림 1에서 구간 Z_1 에서 연계선로 F_2 까지의 직선경로 부하를 Direct Path 1을 따라 구간 $Z_1(600)$, $Z_2(900)$, $Z_4(800)$, $Z_5(700)$ 으로 이루어지며 $DPL_{1,2}$ 는 각 구간의 합인 3000[KVA]가 되며, 같은 방법으로 $DPL_{1,3}$ 를 계산하면 $Z_1(600)$, $Z_2(900)$, $Z_3(1100)$ 의 합인 2600[KVA]가 되는 것을 알 수 있다.

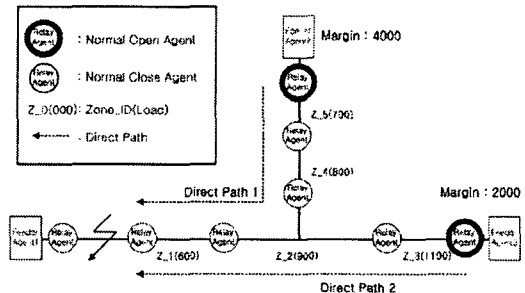


그림 1. 세 개의 선로로 구성된 배전계통

멀티에이전트 시스템에서 직선경로부하 지수를 구하기 위해서는 말단 에이전트에서 상위 에이전트에게 자기 부하 용량 정보를 보내고, 각각 에이전트들은 하위에서 올라온 부하 용량과 자기 부하 용량의 합으로서 직선 경로 부하 지수값을 계산 할 수 있다.

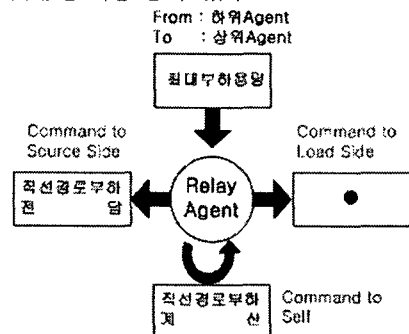


그림 2. Relay 에이전트 직선경로부하 계산 방법

그림 2는 하위 에이전트에게 최대부하용량을 받았을 때 Relay 에이전트가 직선경로부하를 계산하는 방법을 나타내는 것이다.

2.1.2. 후비연계용량 (ZSC:Zone Supporting Capacity)

후비연계용량이란 어떤 선로에서 임의의 구간에 대하여 얼마나 많은 공급여유용량을 제공하는지를 나타내는 지수이다. 연계선로의 공급여유용량에서 어떤 구간까지의 직선경로부하(DPL)을 뺀 값으로 정의하며 구간 Zi에 대한 연계선로 Fj의 후비연계용량(ZSC)은 ZSC_{i,j}라고 표현한다. 그림 1에서 ZSC_{1,2}는 F2의 공급여유용량 4000[KVA]에서 직선경로부하인 DPL_{1,2} 3000[KVA]을 뺀 1000[KVA]가 된다. ZSC_{1,3}는 -600[KVA]로 계산되는데, 여기서 ZSC가 음수라는 의미는 Z1의 전원 측 사고 시에 구간 Z1이 연계선로 F3으로 절체 될 수 없음을 의미한다.

멀티에이전트 시스템에서는 상시연계점인 에이전트가 연계선로의 공급여유용량을 알고 있고, 그 값에서 자기 부하 용량을 뺀 값이 후비연계용량이 되며 그 값을 상위 에이전트에게 보내준다. 후비연계용량은 계통 구성에 따라 여러 개의 값을 가질 수 있는데, 여러 개의 값 중 가장 큰 값이 다음에 설명할 구간 복구지수값이 된다.

그림 3은 Relay 에이전트가 후비연계용량을 계산하는 방법을 나타낸 것이다.

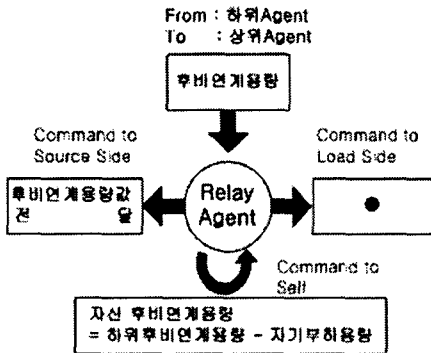


그림 3. Relay 에이전트 후비연계용량 계산 방법

2.1.3 구간 복구지수 (ZRI:Zone Restoration Index)

구간 복구 지수라 함은 어떤 구간의 부하 측에 연결된 연계선로 중 후비연계용량(ZSC)이 가장 큰 연계선로를 주연계선로(MBF:Main Backup Feeder)라 부르고, 주연계선로의 후비연계용량(ZSC)을 그 구간의 구간복구지수(ZRI)라고 정의한다. 다시 말해서 자신의 후비연계용량 중 가장 큰 값이 구간 복구지수가 되며 주연계선로는 복구 시 공급받을 선로가 되는 것이다. 구간 Zi에 대한 구간복구지수 ZRI는 식(1)과 같이 표현된다.

$$ZRI_i = \frac{MAX}{j} (ZSC_{i,j}) \dots\dots\dots (1)$$

구간복구지수(ZRI)의 크기는 주연계선로가 해당구간을 복구한 후 남는 여분의 공급여유용량을 나타내는 것으로 어떤 구간의 구간복구지수가 0보다 크다는 것은 그 구간의 전원 측에서 사고가 발생하였을 때 최소한 그 구간은 복구될 수 있다는 의미이다. 어떤 구간의 구간복구지수가 0보다 작다면 인접한 전원 측 구간 사고 시 그 구간은 복구될 수 없다. 그림 1에서 구간 Z1의 부하 측 연계선로 F2, F3 중에서 큰 후비연계용량(ZSC)을 공급하는 연계선로인 F2가 주연계선로(MBF)이며 F2의 후비연계용량(ZSC_{1,2}) 1000[KVA]가 구간 Z1의 구간복구지수(ZRI₁)가 된다.

2.1.4 선로 복구지수 (FRI:Feeder Restoration Index)

선로복구지수(FRI)는 구간복구지수(ZRI)를 확장한 개념으로서 선로의 복구능력을 나타내는 지수이다. 어느 하나의 구간이라도 복구능력이 부족하면 선로 전체의 복구능력이 부족한 것이므로 선로상의 모든 구간의 복구지수 중 최소치로 나타내며 식(2)와 같이 표현된다.

$$FRI = \frac{MIN}{k} (ZRI_k) \dots\dots\dots (2)$$

선로복구지수가 FRI가 0보다 크면 선로상의 어느 구간에서 고장이 발생하더라도 부하 측의 모든 건전한 정전 구간이 복구될 수 있음을 의미하며, 0보다 작다면 정전 고장 발생시 복구될 수 없는 구간이 존재함을 의미한다.

2.2 에이전트 정보

2.2.1 Relay 에이전트 정보

Relay 에이전트는 OCR 에이전트, Recloser 에이전트가 있으며, 이 에이전트들은 복구 지수 계산을 위해 자신을 기준으로 양쪽 구간의 부하 용량, 후비 여유 용량, 구간 복구 지수 및 주연계선로 정보를 가지고 있다. Relay 에이전트들은 다른 에이전트들에게 복구 신호를 받았을 경우 자신 양쪽의 주연계선로 정보가 다를 경우 close 상태를 open 상태로 변경해야 한다. 그 이유는 양쪽 구간의 주연계선로가 다르기 때문에 계통을 분리 시켜야 하기 때문이다. 그리고 Relay 에이전트가 상시연계점일 경우에는 현재 공급 받고 있는 피더의 여유 용량도 알고 있어야 한다. 이 정보를 가지고 다른 연계선로에 있는 에이전트들이 복구 지수를 계산하게 된다.

2.2.2 Feeder 에이전트 정보

Feeder 에이전트는 자신의 최대 공급 용량 정보와 현재 공급하고 있는 용량 정보를 가지고 있어야 한다. 이 두 가지 정보를 가지고 말단에 있는 상시연계점이 여유용량을 계산하게 된다.

2.3 사례연구

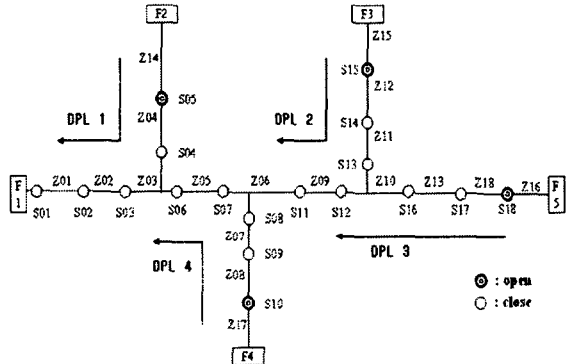


그림 4. 사례연구 계통도

그림 4는 복구 지수 계산을 위한 사례연구 계통도이고 표 1은 각 구간의 부하 용량과 각 피더의 용량을 나타내고 있다. 각 피더의 용량에서 Z14, Z15, Z16, Z17 구간의 부하용량을 뺀 값이 각 연계선로의 공급 여유용량이다. 그래서 F2는 3000[KVA], F3은 2900[KVA], F4는 2100[KVA], F5는 4,000[KVA]의 공급여유용량을 가지게 된다.

피더1에 대해서 4개의 연계선로가 있고 그 연계선로에 대해서 각각의 복구 지수를 계산한다. 복구지수계산은 Direct Path를 통해 직선경로부하를 먼저 계산하는데 이

계통도에서는 Direct Path가 4개가 있으며, 그 path를 통해 구한 직선경로부하의 값은 표 2와 같다.

표 1. 사례연구계통도 데이터

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9
부하용량	300	400	300	500	900	800	600	700	400
	Z10	Z11	Z12	Z13	Z14	Z15	Z16	Z17	Z18
부하용량	600	500	700	700	7,000	7,100	7,900	6,000	400
각 Feeder 용량 : 10,000[KVA]									

표 2. 직선경로부하

	Z1	Z2	Z3	Z4					
DPL 1	1500	1,200	800	500					
	Z1	Z2	Z3	Z5	Z6	Z9	Z10	Z11	Z12
DPL 2	4,900	4,600	4,200	3,900	3,000	2,200	1,800	1,200	700
	Z1	Z2	Z3	Z5	Z6	Z9	Z10	Z13	Z18
DPL 3	4,800	4,500	4,100	3,800	2,900	2,100	1,700	1,100	400
	Z1	Z2	Z3	Z5	Z6	Z7	Z8		
DPL 4	4,000	3,700	3,300	3,000	2,100	1,300	700		

표 2에서 구한 직선경로 부하값을 이용하여 후비연계용량을 구할 수 있고 연계선로의 여유용량에서 직선경로부하값을 빼면 후비연계용량값이 계산되며 그 결과는 표 3과 같다.

표 3. 후비연계용량

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7
F2	1500	1800	2200	2500	•	•	•
F3	-2000	-1700	-1300	•	-1000	-100	•
F4	0	300	700		1,000	1,900	2,700
F5	-2700	-2400	-2000	•	-1700	-800	•
	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12	Z13	Z18
F2	•	•	•	•	•	•	•
F3	•	700	1100	1700	2200	•	•
F4	3,300	•	•	•	•	•	•
F5	•	0	400	•	1000	1000	1700

표 3의 결과에 의해 각 구간의 구간 복구지수와 주연계선로를 구할 수 있으며 그 결과는 표 4와 같다.

표 4. 구간 복구지수 및 구간별 주연계선로

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7
구간 복구지수	1,500	1,800	2,200	2,500	1,000	1,900	2,700
주연계선로	F2	F2	F2	F2	F4	F4	F4
	Z8	Z9	Z10	Z11	Z12	Z13	Z18
구간 복구지수	3,300	7,000	1,100	1,700	2,200	1,000	1,700
주연계선로	F4	F3	F3	F3	F5	F5	F5

3. 결 론

방사상 배전계통에서 고장이 발생되면 고장구간 부하측의 건전한 정전구간을 이웃한 연계선로로 절체하여 신속히 전력공급을 재개하여야 한다. 또 배전계통 운영환경이 급격히 변화하고 있으므로 이에 적합한 새로운 운전기준과 적용방법이 요구되고 있다. 이를 해결하기 위해서 본 논문에서는 멀티에이전트 시스템을 이용한 자율적용 배전계통 보호 시스템에 배전선로의 복구능력을 평가할 수 있는 복구 지수와 개별 에이전트들이 가져야 할 정보에 대해서 설명 하였으며, 사례연구를 통해서 복구 지수를 구하는 방법을 예로 들었다.

향후 연구 계획으로는 자율 적용 기능을 가지고 있는 멀티에이전트 시스템에 자율 정전 복구 기능을 추가하여 건전한 정전구간이 발생하였을 경우 신속히 연계선로로부터 전력을 공급할 수 있는 복구 시스템을 연구 할 계획이다.

[감사의 글]

본 연구는 과학기술부·한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

[참고 문헌]

- [1] H. Fudo, et al, "An Expert System for Restoration of Distribution Network", 3rd Symposium on Expert System Application to Power Systems, 1994.
- [2] V.Susheela Devi, G.Anandalingam, "Optimal Restoration of Power Supply in Large Distribution Systems in Developing Countries", IEEE Tr. on Power Delivery, Vol10, No.1, pp.430-437, 1993.
- [3] Yuan-Yih Hsu, et al, "A Heuristic Based Fuzzy Reasoning Approach for Distribution System Service Restoration", IEEE Tr. on Power Delivery, Vol.9, No.2, pp.948-953, 1994.
- [4] K. Aoki, K. Nara, M. Itoh, T. Satch, and H. Kuwabara, "A New Algorithm for Service Restoration in Distribution Systems", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 4, No. 3, July 1989
- [5] A. L. Morelato and A. Monticelli, "Heuristic Search Approach to Distribution", Paper 89 WM 111-6 PWRD, Presented at the IEEE/PES 1989 Winter Meeting.
- [6] V. Susheela Devi, D. P. Sen Gupta and G. Anandalingam, "Optimal Restoration of Power Supply in Large Distribution Systems in Developing Countries", IEEE Tr. Power Delivery, Vol. 10, No. 1, pp. 430-438, January 1995.
- [7] 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.
- [8] C. C. Liu, M. S. Tsai, V. N. Mesa and R. Hartwell, "Alleviation of Abnormal Feeder Operating Condition with a Real Time Expert System Environment", 3rd Symposium on Expert System Application to Power Systems, April 1991.
- [9] S. J. Lee, J. Y. Yoon, T. H. Kim, K. H. Kim, H. Y. Kim and H. M. Kim, "Operational Planner with General Switching Sequencer in Das Control Center", Intelligent System Application to Power Systems, pp. 273-278, 1994
- [10] 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.