

지하철 전력계통에서의 사고복구 시스템 알고리즘 개발

김지웅 * 류현수 이종기 문영현
연세대학교 전기공학과

Fault Restoration Algorithm for Subway Power System

J.U. Kim * H.S. Ryu J.G. Lee Y.H. Moon
Dept. of Electrical Eng., Yonsei Univ.

Abstract - This paper is to introduce a more effective and flexible restoration algorithm composed to the fault preventing and restoring system now in use. This was possible by considering the changes that can occur by the proper or the improper run of the Feeder, which the power system restoration method now using didn't consider. The new algorithm uses the method minimizing the loss with respect to the load changes occurring when the power system is restored, rather than just simply following the SOP that is only composed of a single Feeder On/Off combination. This can present the more effective power system running method for the safer subway running and passenger transport, by giving the system operator the chance to choose between the SOP and the minimum loss method.

1. 서 론

전철 지하철용 전력시스템은 SCADA(원방 감시 시스템)에 의한 원방제어/감시 기능만을 가지고 운전되고 있다. 원격제어기능, 전기설비 감시, 원격 계측, 데이터 기록 등 많은 데이터가 주기적으로 시스템에 유입되어 시스템 운전원에게 정보를 제공하고 있으나 원시데이터 형태의 정보여서 전력계통의 상태를 파악, 감시하는데 숙련된 운용기술과 직관을 요구하고 있다. 또한 현재 적용되는 SCADA는 단순히 H/W 감시·제어 기능만을 가지고 있고, 지하철의 안전운행에 절대적으로 필요한 사고 예방 및 사고복구 시스템 기능을 가지고 있지 않아 효율적인 지하철 운행 및 안전한 승객 수송에 큰 위험부담을 안고 있다. 현재 장애 발생시, 지하철에서는 SOP(표준작업절차)에 의해 단 한가지의 계통구성 방안을 사용하고 있다. 그러나 각 변전소 담당 부하의 변동이 없는 하나의 계통에서, 계통의 구성이 변경되었을 때, 이에 따른 손실의 증감은 선로 손실에 기인한다. 그러므로 변전소 사이를 연결하는 Feeder의 사활 여부에 따라 계통이 재구성되고 손실도 달라지게 되므로 한가지의 계통구성 방안으로는 모든 부하 상태에 대해서 최적의 구성안이 될 수 없다.

이 논문에서는 대구 지하철을 대상으로 장애 발생시 개폐기의 절체 횟수 및 운전손실을 최소화하는 최적의 절체 방안을 사고 형태별로 분석하여 제시한다. 또한 정상 운전시에서도 계통의 재구성이 가능한 Feeder의 On/Off 조합을 이끌어내어 최적의 운전 방안을 제시하였다. 따라서 본 시스템이 제시하는 방안은 SOP와 불일치할 수 있으며, 이 때는 운영자에게 시스템 권고안과 SOP안을 동시에 제공하여 취사 선택하므로 실제 적용에 있어서도 더 큰 융통성과 효과를 가질 수 있을 것이다.

2. 사고복구 시스템 알고리즘

2.1 입출력에 대한 정의 및 가정

정상 운전시의 계통 재구성 방안은 운전부하에 따른 계통손실 시뮬레이션에 따라 달라지게 된다. 따라서 계통 재구성 방안을 제시하는 경우의 입력은 계통 Topology와 함께 각 변전소들의 평균부하가 된다. 계통 Topology입력은 전력정보시스템의 D/B로부터, 그리고 변전소 평균부하는 운영자의 수작업 입력으로 한다. 장애발생시의 복구방안을 제시하는 경우는 입력으로 계통 Topology는 전력정보시스템의 D/B로부터, 그리고 부하는 장애발생 시점의 각 변전소 부하가 되므로 이 경우는 SCADA로부터 계통 장애 발생 직전의 부하데이터를 읽어들인다.

정리해보면, 다음과 같다.

① 계통 재구성 방안

i) 입력

가. 계통 Topology

- 전력정보시스템 D/B에 선구축하여 이로부터 취득

나. 변전소 평균부하

- 운영자 수작업 입력

ii) 출력

가. 개폐기 최적 구성안 및 SOP

나. 시스템 권고안과 SOP, 각 경우의 손실 등 비교치 및 개폐기 조작순서

② 장애발생 복구 방안

i) 입력

가. 계통 Topology

- 전력정보시스템 D/B에 선구축하여 이로부터 취득

나. 장애발생시 부하

- SCADA로부터 입력

ii) 출력

가. 개폐기 최적 구성안 및 SOP

나. 시스템 권고안과 SOP, 각 경우의 손실 등 비교치 및 개폐기 조작 순서

2.2 계통 재구성 가능 Feeder 조합구성

각 변전소마다 그 변전소 담당 부하의 변동이 없는 한 계통 구성의 변경에 따른 손실 증감은 선로 손실에 기인하게 된다. 따라서 변전소간을 연결하는 Feeder의 사활 여부에 따라 계통이 재구성되고 손실도 달라지게 된다.

다음 그림에서 보여주는 대구 지하철의 계통도를 예로 들어보자.

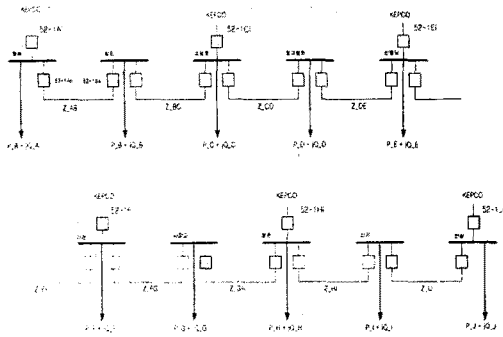


그림 1. 대구 지하철의 계통도

대구지하철의 경우 변전소 연락 Feeder의 수는 9개로, 단순히 Feeder의 On/Off 조합만을 따진다면 $2^9=512$ 개가 생겨 최적 재구성안을 찾는 것은 어려운 일이 된다. 하지만 실제적으로 지하철 교류계통에서는 전압 및 위상차 때문에 병렬급전을 실시하지는 않으며 따라서 Feeder의 On/Off 조합에 다음과 같은 제약 조건을 적용시키면 가능한 계통 재구성의 수는 대폭적으로 줄어든다.

- ① 두 한전 수전변전소가 이웃하고 있는 경우 수전변전소간 연락 T/L은 Must off이어야 한다.
- ② 연락변전소는 어느 한 쪽의 한전 수전변전소로부터만 공급을 받아야 하므로 좌측 Feeder가 On이라면 우측 Feeder는 Must Off, 반대의 경우도 마찬가지이다.

2.3 사고복구 전문가 시스템 알고리즘 개발

2.3.1 사고 형태 분석

지하철에서의 계통 사고는 4개의 커다란 사고로 분석할 수 있다. 첫 번째는 수전 선로 사고, 두 번째는 연락 선로 사고, 세 번째는 22.9kV 모선 사고, 마지막으로 고압배전(6.6kV) 모선 사고로 나누어 생각할 수 있다.

2.3.2 사고 복구 전문가 시스템 알고리즘 개발

앞 절에서 보았던 사고 형태에 따라 각각의 알고리즘을 다음과 같이 구성할 수 있다. 본 논문이 제시하는 알고리즘이 기존의 SOP와 가장 큰 차이점이려면, 사고의 계통을 Load flow를 통해 해석함으로써 손실을 최소화하는 최적의 절체 방안을 선택할 수 있도록 한다는 점이다.

① 수전 선로 사고시 복구방안 알고리즘

- i) 사고 변전소에 전력을 공급할 수 있는 연락선로 개폐기 조합계산(N개 방안)
- ii) 전체 지하철 계통을 5개의 계통으로 분할(1계통구성 : 1기1~4모선)
- iii) 각 계통에 대해 교류 조류 조류계산
- iv) N개의 조합에 대해 과정 ii)-iii) 반복 계산
- v) 최소 전압강하, 최소 선로 손실, 최소 개폐기 조작 횟수 선택
- vi) 과정 v)에서 선택된 인자에 적절한 Weighting Factor를 곱하여 최적 절체 방안 선택

② 연락 선로 사고시 복구방안 알고리즘

- i) 전력이 중단된 변전소에 다른 수전 변전소로부터 전력을 공급할 수 있는 연락선로 개폐기 조합계산
- ii) 전 지하철 계통을 6개의 계통으로 분할
- iii) 각 계통에 대해 교류 조류 조류계산
- iv) N개의 조합에 대해 과정 ii)-iii) 반복 계산
- v) 최소 전압강하, 최소 선로 손실, 최소 개폐기 조작 횟수 선택

vi) 과정 v)에서 선택된 인자에 적절한 Weighting Factor를 곱하여 최적 절체 방안 선택

③ 모선 사고시 복구방안 알고리즘

- i) 사고 모선이 수전변전소 모선일 때 수전 선로 사고(①항)와 동일한 알고리즘을 선택
- ii) 사고 모선이 연락변전소일 때 22.9kV 연장 급전 없음

④ 고압 배전 모선 사고시 복구방안 알고리즘

- i) 전력이 중단된 전기실에 다른 변전소로부터 전력을 공급할 수 있는 연락선로 개폐기 조합계산
- ii) 전 배전 계통을 10개의 계통으로 분할
- iii) 각 계통에 대해 교류 조류 조류계산
- iv) N개의 조합에 대해 과정 ii)-iii) 반복 계산
- v) 최소 전압강하, 최소 선로 손실, 최소 개폐기 조작 횟수 선택
- vi) 과정 v)에서 선택된 인자에 적절한 Weighting Factor를 곱하여 최적 절체 방안 선택

위에서 살펴본 바와 같은 알고리즘을 가지고 흐름도를 그려보면 다음과 같다.

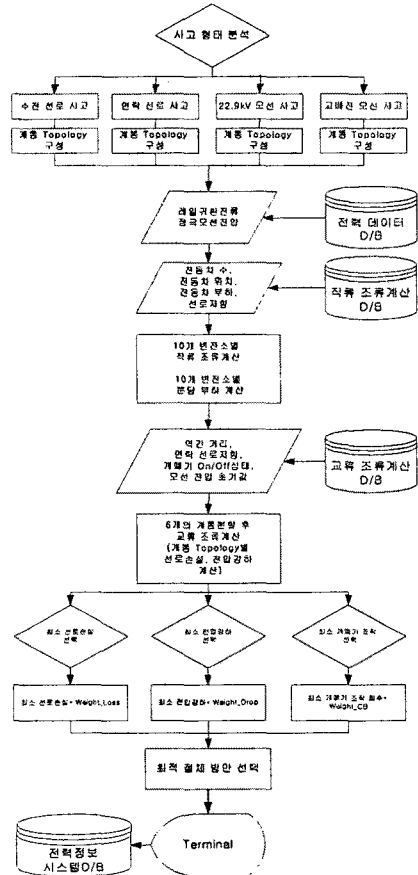


그림 2. 사고 복구 전문가 시스템 flowchart

3. 사례 연구

3.1 수전 선로 사고시

- ① 모선 C(성당못 변전소)에서 사고가 발생한 경우 이 경우, 그림 3.에서 보는 바와 같이 그림 1.의 정상

상태인 경우와 개폐기 On/Off 조합이 바뀐 걸 알 수 있다(검게 칠한 부분이 개폐기 On, 흰 부분이 Off). 이는 표 1.에서 보이는 바와 같이 최소 손실을 나타내는 개폐기 조합이다(case9의 경우).

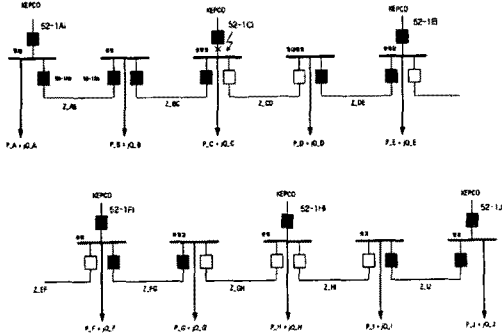


그림 3. 모선 C에서 사고가 발생한 경우의 최적 계통도

case	Z_AB	Z_BC	Z_CD	Z_DE	Z_EF	Z_FG	Z_GH	Z_HI	Z_IJ	손실
1	O	O	X	O	X	X	O	X	O	1.013059885
2	O	X	O	O	X	X	O	X	O	1.028950747
3	O	O	O	X	X	X	O	X	O	1.055657271
4	X	O	O	O	X	X	O	X	O	1.095592727
5	O	O	X	O	X	O	X	O	X	1.108598602
6	O	X	O	O	X	O	X	O	X	1.124489463
7	O	O	O	X	X	O	X	O	X	1.108598602
8	X	O	O	O	X	O	X	O	X	1.191131444
9	O	O	X	O	X	O	X	X	O	1.008027163
10	O	X	O	O	X	O	X	X	O	1.023918024
11	O	O	O	X	X	O	X	X	O	1.050624548
12	X	O	O	O	X	O	X	X	O	1.090560007
13	O	O	X	O	X	X	O	O	X	1.113631909
14	O	X	O	O	X	X	O	O	X	1.129522770
15	O	O	O	X	X	X	O	O	X	1.156229294
16	X	O	O	O	X	X	O	O	X	1.196164751

표 1. 모선C에서 사고 발생시 계통 재구성 조합과 손실

이 경우 표 1.에서 보논바와 같이 계통 재구성의 조합은 모두 16가지 경우가 나온다. 그 중에서 case1이 SOP가 된다. 그러나 제시한 알고리즘으로 조류계산을 통해 각 case의 손실을 계산해보면, case9의 경우가 가장 손실이 적음을 알 수 있다(손실 계산은 모두 pu단위로 이루어졌다). 표 1.에 나타나진 않았지만 개폐기의 조작 횟수는 모든 case에 대해 4번씩이다. 그렇다면, 이처럼 SOP로 사용하고 있는 계통 구성방안은 모든 부하상태에 대한 최적의 구성안이 될 수 없음은 자명한 일이며, 이러한 경우에 SOP안과 손실이 가장 적은 case9안을 취사 선택할 수 있다.

② 모선 J(안심 변전소)에서 사고가 발생한 경우

case	Z_AB	Z_BC	Z_CD	Z_DE	Z_EF	Z_FG	Z_GH	Z_HI	Z_IJ	손실
1	O	X	O	X	X	O	X	O	O	2.603840179
2	O	X	O	X	X	X	O	O	O	2.613873486
3	O	X	X	O	X	O	X	O	O	2.608457515
4	O	X	X	O	X	X	O	O	O	2.613490822
5	X	O	O	X	X	O	X	O	O	2.610152431
6	X	O	O	X	X	X	O	O	O	2.615185737
7	X	O	X	O	X	O	X	O	O	2.609769767
8	X	O	X	O	X	X	O	O	O	2.614803073

표 2. 모선J에서 사고 발생시 계통 재구성 조합과 손실

이 경우 역시 ①의 경우와 비슷하다. SOP안은 case1의 경우이나 최소 손실을 보이는 것은 case3이며, 이때 역시 두 개의 case중 하나를 선택할 수 있다.

3.2 연락 선로 사고시

○ 선로 Z_CD가 사고났을 경우

case	Z_AB	Z_BC	Z_CD	Z_DE	Z_EF	Z_FG	Z_GH	Z_HI	Z_IJ	손실
1	O	X	X	O	X	O	X	O	X	1.025525997
2	O	X	X	O	X	O	X	X	O	0.924954559
3	O	X	X	O	X	X	O	O	X	1.030559305
4	O	X	X	D	X	X	O	X	O	0.929987282
5	X	O	X	O	X	O	X	O	X	1.026838250
6	X	O	X	O	X	O	X	X	O	0.926266811
7	X	O	X	O	X	X	O	O	X	1.031871556
8	X	O	X	O	X	X	O	X	O	0.931299533

표 3. 연락 선로 CD에서 사고 발생시 계통 재구성 조합과 손실

연락 선로 사고시의 계통 재구성 조합을 살펴보면 표 3.과 같다. 이 때, 각 case에 대해 교류 조류계산을 통해 각 경우의 손실을 구해보면, 수전 선로 사고시와 크게 다를바가 없다. SOP안은 case4이며 선로 손실이 최소인 경우는 case2이다(마찬가지로 개폐기 조작 횟수는 모든 case에 대해 4이다). 시스템 관리자는 연락 선로 사고가 났을 경우, 복구 방안으로 SOP안과 손실이 최소인 case2 중에서 취사 선택할 수 있다.

4. 결 론

지하철 안전운행을 위해서는 무엇보다 사고 예방과 장애 발생 시에 복구가 얼마나 효과적으로 이루어지는가 하는 것이 중요하다. 현재 지하철 계통 운영에 쓰이는 SOP는 단 한가지의 계통 구성 방안을 채택하고 있기 때문에 계통의 구성 변화에 따른 부하 변동에 대해 최적의 구성안이 될 수 없음을 사례를 통해 알아보았다.

본 논문에서 제시한 알고리즘은 이러한 부하 변동에 대해 계통의 재구성과 그에 따른 Feeder의 On/Off 조합을 이끌어내어 각 조합의 경우에 대한 조류계산을 시행하고, 최소 전압강하·최소 선로 손실·최소 개폐기 조작 횟수등을 고려, 최적의 절체 방안을 선택할 수 있게 함을 사례연구에서 보듯이 알 수 있었다. SOP와 일치하지 않을 수 있어서 시스템 운영자가 취사 선택하게 함으로써 실제 지하철 계통에 적용할 때, 융통성과 효과를 더욱 증대시킬 수 있을것으로 기대된다.

(참 고 문 헌)

- [1]대구광역시 지하철공사 전력사령실, "사고시 자동절체 및 원격제어"
- [2]대구광역시 지하철 건설본부, "대구지하철 1호선 기자재 및 장비구매 사양서", 1993
- [3]문형원, 김백 외, "전력계통의 종합적인 안정도 해석(중간 보고서)", 한국과학재단, 1994
- [4]Weimin Ma, James S. Thorp, "An Efficient Algorithm To Locate All The Load Flow Solutions", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, pp.1077-1083, August 1993