

전력계통 고장복구 교육 시스템에 관한 연구

이홍재^{*}·김중문^{*}·이경섭^{*}·박성민^{*}·송인준^{*}·이남호^{**}·배주천^{**}·황봉환^{***}
 광운대학교 전기공학과^{*} · 전력연구원^{**} · 한국전력거래소^{***}

A study on the power system restoration simulator

H.J. Lee^{*} · J.M. Kim^{*} · K.S. Lee^{*} · S.M. Park^{*} · I.J. Song^{**} · N.H. Lee^{**} · J.C. Bae^{***} · B.H. Hwang^{***}
 KwangWoon University^{*} · Korea Electric Power Research Institute^{**} · Korea Power Exchange^{***}

Abstract - This paper presents an operator training simulator for power system restoration against massive black-out. The system is designed especially focused on the generality and convenient setting up for initial condition of simulation. The former is accomplished by using on line calculation methodology, and PSS/E data is used to define the initial situation. The proposed simulator consists of three major components - the power flow(PF) module, data conversion(CONV) module and GUI subsystem. PF module calculates power flow, and then checks overvoltage of buses and overflow of lines. CONV module composes an Y-Bus array and a data base at each restoration action. The initial Y-Bus array is constructed from PSS/E data. The user friendly GUI module is developed including graphic editor and built-in operation manual. As a result, the maximum processing time for one step operation is 15 seconds, which is adequate for training purpose. Comparison with PSS/E simulation proves the accuracy and reliability of the training system.

본 논문에서는 전력계통 분야에서 통상적으로 널리 수행되고 있는 사례기반의 시스템을 구축하는 것을 지양하였고, 임의의 초기 조건으로부터 운용자의 임의 제어에 의하여 적절한 시간 내에 복구의 각 단계를 진행할 수 있도록 하였다. 또한 복구단계에서 과부하 및 과전압이 발생하면 그 이전 상태로 복귀하여 새로운 복구조작을 시도하는 형식의 시스템을 개발하였다.

2. 고장 복구 시스템

일반적인 고장복구 시스템은 계통의 초기조건 설정에 관련된 데이터의 양이 매우 방대하므로 우리나라 계통해석에 널리 사용되고 있는 PSS/E 데이터를 시스템의 초기 입력 데이터로 하였으며, 데이터 변경을 용이하도록 하기 위해 내장된 컨버전 프로그램을 통하여 자체 DB를 구축하였다. 본 교육 시스템은 크게 전력조류를 계산하고 과부하 및 과전압을 체크하는 PF 모듈, PSS/E raw data를 읽어 Y버스의 구성 및 자체 DB를 작성하고 이용하는 CONV 모듈, 그리고 사용자 하여금 편리하게 모의를 가능토록 그래픽 환경을 제공하는 GUI 모듈로 구성되며, 각 모듈의 구성은 그림 1과 같다. 계통 설비의 신설 등에 의해 계통 구조가 변경될 경우, 이러한 계통 정보를 포함한 PSS/E 데이터를 통해 용이하게 DB 및 GUI 화면을 수정할 수 있다. 시스템의 데이터베이스는 그림 1에서와 같이 크게 파일 형태로 관리되는 DSK DB와 빠른 접근 및 갱신을 위해 메모리에 올려 관리되는 DYN DB로 구성된다.

교육 시스템의 기능 중 특징적인 세 가지는 다음과 같다. 첫째, 프로그램 초기 실행시 KMView라는 윈도우에 국내 345kV, 765kV 계통을 나타낸 메인 계통도가 뜨는데, 여기에 화면 전환 기능 및 해당계통 아이콘을 통해 각 시송전 계통도로의 전환도 가능하며, 각 kmd 파일들은 같은 DB를 공유하므로, 서로 연동된다. 둘째, 계통을 복구하는 과정에서 전력조류를 계산하면, 발전기에서 무효전력 공급 한계를 초과할 수 있고, 선로와 버스에서 과부하/과전압이 발생할 수도 있다. 이런 경우 시각적인 경고 기능을 통해 사용자에게 주의를 줄 수 있다. 마지막으로 복구된 계통의 연계 모의이다. 계통을 복구하는

1. 서 론

전력계통에서 사고 발생시 복구조작은 계통운용자의 전문적인 지식이나 경험적 판단에 의하여 수행되어 왔으며, 이 때 운용자가 사고 상황을 잘못 판단하거나 잘못된 조작을 수행하게 되면 전력공급에 막대한 지장은 물론 설비의 손상까지도 야기될 수 있다. 따라서 사고에 대처하기 위한 신속한 판단과 복구는 매우 중요한 문제이다. 우리나라의 전력계통은 선진국과 대비하여도 손색이 없는 설비를 갖추고 있으며, 동적 안정도의 측면에서도 매우 튼튼한 구조를 갖추고 있다. 계통의 구조적인 측면에서 볼 때, 선진국의 경우 우리나라보다 상대적으로 취약하므로 광역정전의 사례가 많이 발생하였으며, 특히 스웨덴 같이 취약한 루프구조를 가진 나라에서는 상당히 빈번한 사고가 발생하였다[1]. 이러한 선진국의 계통 운용자들은 광역정전 및 전 정전에 대한 경험이 풍부하나, 국내에서는 이러한 정전의 사례가 없었으므로, 운용자의 경험이 전무한 상태라 할 수 있고, 비상시 대처능력을 발휘할 기회는 점점 감소하고 있다.

따라서 운용자들에게 광역정전 및 전 정전 상황에 대한 효과적인 계통 복구훈련 기회를 제공하고, 실제 정전 상황 발생시 이들이 신속하고 정확한 복구를 수행할 수 있도록 지원함으로써 위기대처능력 향상을 모색하기 위한 전력계통 복구 교육시스템이 필요하다[2-6]. 이러한 고장복구 교육을 위한 시스템에 공인된 상업용 계통해석 패키지를 사용할 경우 피교육자가 시스템을 통해 임의 제어하는 것이 불가능하다. 현재 널리 사용되고 있는 상용 프로그램인 PSS/E는 예정된 시나리오에 대한 모의 실행하므로 사용자로 하여금 임의의 복구 작업을 수행할 수 있는 환경을 제공하지 못한다.

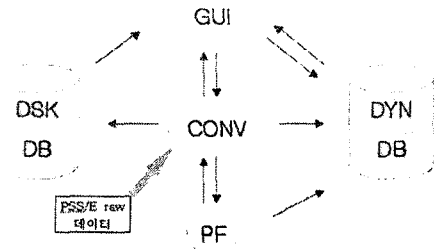


그림 1. 고장복구 시스템의 각 모듈구성

방식에 있어, 여러 개의 분할 계통을 각각 복구한 후, 각각의 계통들을 연계하는 것이 신속한 복구에 합당하며, 세계 여러 계통의 복구 방식 또한 대동소이하다[7-11]. 본 시스템에서도 복구된 각각의 계통을 *.cas 파일로 저장한 후, 연계될 계통 파일을 동시에 불러서 연계 모드를 수행할 수 있다.

2.1 PF 모듈

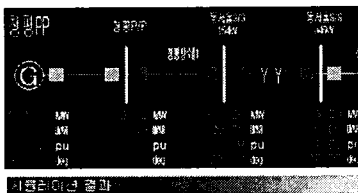
고장복구 시스템에서는 경제 급전계획이 아닌 전 정전 또는 광역정전시의 복구과정을 교육하는 것이 목적으로 복구과정에서 운전자가 조작한 제어입력에 대해 전력조류계산을 수행하고, 계산 결과를 GUI에 각 선로의 유효전력과 무효전력 및 모선의 전압과 선로의 과부하등을 표시함으로써 전 정전 또는 광역정전시 복구과정에 대한 운전자의 교육 효과를 높일 수 있다.

조류 계산에 이용하는 수치 해석 방법 중 가우스 법은 뉴턴법에 비하여 초기값에 강인하지만 수렴 속도가 비교적 느리다. 이에 반하여 뉴턴법은 수렴속도는 빠른 반면에 초기값이나 기타 계통 상황에 따라 비교적 쉽게 발산한다. 그러므로 계통 상황이 안 좋은 복구 특성상 발산이 일어나기 쉬운 것으로 예상되어 가우스 법과 뉴턴법을 혼합하여 사용한다. 초기값에 민감한 수렴특성을 보이는 뉴턴법의 반복 계산이 이루어지기 이전 단계에서 초기값 추정을 위하여 가우스법을 이용하여 대충의 초기값을 잡아준다. 그 결과, 뉴턴법 단독으로는 수렴하기 힘든 R-X Ratio가 비교적 큰 계통의 경우에도 좋은 결과를 보여 주었다. 이와 같이 PF 모듈은 CONV에서 구성된 Y버스를 기반으로 전력 조류 계산을 수행하고, 계산 결과 값을 공유 DB에 저장하여 그림 2와 같이 GUI 모듈에서 각 선로의 유효전력과 무효 전력 및 모선의 과전압과 선로의 과부하등을 표시하게 된다.

2.2 CONV 모듈

CONV 모듈은 PSS/E raw 데이터를 읽어서 자체 DB화한 후, GUI 모듈과 PF 모듈에 데이터를 주고받는 모듈로써, PSS/E 데이터 중 정적 데이터와 동적 데이터를 분리해서 필요한 데이터만 추출한다.

동적 데이터는 전력 조류 계산에 필요하거나, 그 결과로 나오는 데이터로서 수시로 접근되어 계속 변할 수 있어야 한다. 해당모선의 유효전력, 무효전력, 모선 전압, 위상각, On/Off 상태, 타입(부하, 발전기, 슬랙) 선로의 On/Off 상태, Y버스의 구성 요소 등이 이에 해당되며 빠른 접근을 위해 메모리(DYN DB)에 저장한다. PSS/E raw 데이터 중 이들을 제외한 나머지 데이터는 계통 구성에 관계된 정적 데이터로서 디스크(DSK DB)에 저장된다. CONV 모듈은 현재의 공유메모리(BUS, LINE Dynamic DB)를 참조하여, Y버스 데이터(공유메모리)를 생성한 후 시뮬레이션 시작 명령을 PF 프로세스에 전달한다.



(a) 모의 결과 계통도

```
<< 시뮬레이션 환경(주입) >>
0001 : [05465 - 25441 BRANCH] 과부하
0002 : [02500 BUS] 과전압
0003 : 총발전량 [300.204579]
0004 : 총부하량 [-299.999991]
```

(b) 모의 결과 팝업 윈도우

그림 2. 과전압/과부하 발생 모의 결과

2.3 GUI 모듈

GUI 모듈은 운용자의 사용편의를 최대한 고려하기 위해 GUI를 손쉽게 수정할 수 있는 그래픽 편집기를 내장하고 있다. 또한, 사용자의 임의 제어 입력을 받으면 PF와 CONV 모듈로 신호를 전달하여, 시뮬레이션이 수행되고 그 결과를 공유메모리로부터 읽어 들여 GUI 화면에 모션, 변압기, 선로의 On/Off 상태를 표시한다.

각 설비의 정보를 표시하기 위하여 TAG값에 대한 DB를 구축하였으며, TAG DB는 PSS/E raw 데이터를 기반으로 작성되고 아날로그와 디지털 입력 DB로 구분한다. 아날로그 입력 DB는 전력조류 계산 결과(모선의 유효전력, 무효전력, 전압, 위상각, 부하모선의 과전압, 발전기의 무효전력한계 초과)와 사용자가 임의로 지정할 수 있는 모션 정보 및 변압기의 탭 값을 처리하기 위한 것이며, 디지털 입력 DB는 선로와 변압기의 On/Off 상태를 표현하기 위한 것이다.

GUI 모듈은 사용자가 시험 환경 구축을 위하여 각 계통의 구성 요소를 조작(선로 상태의 On/Off, 부하조절)한 후, PF의 조류 계산 결과를 이용하여 과전압, 과부하 여부를 계통도에 표시한다. 또한 시뮬레이터 관련 기능으로 복구를 수행하다가 어떤 선로에 과부하가 걸릴 경우 새로운 경로 모색을 하기 위해서 바로 전 스텝으로 돌아갈 수 있는 Undo 기능, Run Mode 선택(자동/수동), PSS/E data Conversion, Simulation, 계산 과정과 종료를 나타내 주는 동작 표시기능이 있다. 그림 3은 전체 PSS/E 데이터를 기반으로 하여 구현된 시뮬레이터의 초기 화면으로써 345kV, 765kV 계통을 중심으로 나타내고, 154kV 계통은 시승전 계통에 포함된 설비만을 나타낸다.

3. 사례 연구

본 교육 시스템에 내장된 알고리즘의 정밀도는 교육 효과와 밀접한 관계를 가지므로 개발된 알고리즘의 성능에 대한 검증이 필요하다. 그림 4의 IEEE 10기 39모선 계통을 대상으로 본 프로그램과 국제적으로 공인된 PSS/E의 결과를 비교함으로써 개발된 프로그램에 대한 신뢰성을 확인하였다.

표 1은 대상 계통에 대해 총부하량과 총발전량에 변화를 주었을 경우의 결과이다. 표 2에 그 결과를 정리하였으며, PSS/E와 고장복구 교육 시스템의 조류 계산 결과가 거의 일치함을 알 수 있다.

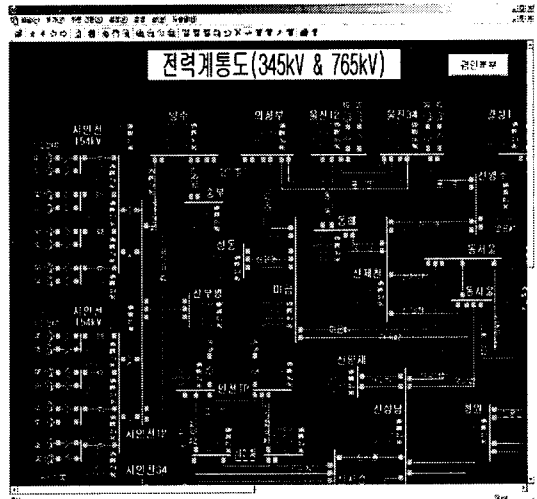


그림 3. 고장복구 시스템 초기화면

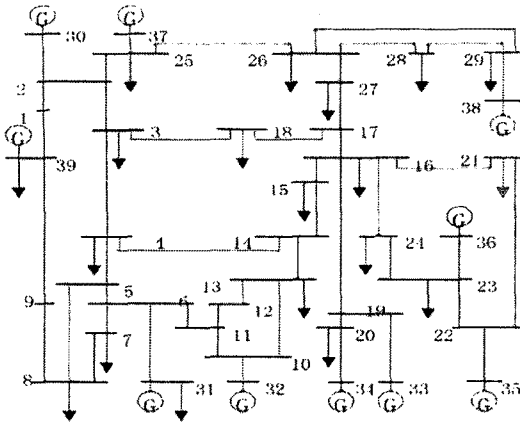


그림 4. IEEE 10기 39보선(New England)

표 1. 시뮬레이션 결과

PSS/E 결과				고장복구 시뮬레이터 결과			
P	Q	V	Theta	P	Q	V	Theta
2.7077	1.2325	0.98	0	2.7085	1.2323	0.98	0
0.5921	0.2248	1.03	4.3	0.592	0.2249	1.03	4.3
2.75	1.9163	1.05	3.57	2.7499	1.9161	1.05	3.57
7.15	1.7171	0.98	8.31	7.1499	1.7169	0.98	8.3
6.9521	0.7336	1	13.37	6.9519	0.7337	1	13.36
5.588	1.5403	1.01	12.51	5.5879	1.5401	1.01	12.51
7.1499	2.6478	1.05	14.63	7.1498	2.6477	1.05	14.62
6.16	2.209	1.06	17.77	6.1598	2.2091	1.06	17.77
5.94	0.2734	1.03	10.2	5.94	0.2734	1.03	10.2
9.1299	0.7798	1.03	17.32	9.13	0.7797	1.03	17.32
0.0001	0.0001	1.03	2.4	0	0	1.03	2.4
0.0001	0.0008	1.02	0.89	0	0	1.02	0.89
3.3811	-0.0233	0.99	2.67	3.381	0.024	0.99	2.67
2.3518	-0.4719	1.03	2.71	2.352	0.472	1.03	2.7
5.2501	1.8392	0.95	4.98	5.25	1.84	0.95	4.98
1.6587	0.2995	0.98	1.87	1.659	0.3	0.98	1.87
0.0002	0.0002	0.95	4.71	0	0	0.95	4.72
0.0001	0.0004	0.96	2.5	0	0	0.96	2.5
0.0001	0.0022	0.95	4.15	0	0	0.95	4.15
5.4808	-1.7596	0.95	6.93	5.481	1.76	0.95	6.93
2.4551	0.8397	0.95	6.47	2.4549	0.84	0.95	6.47
0.0002	0.003	0.96	1.68	0	0	0.96	1.68
0.0001	0.0001	1.01	5.38	0	0	1.01	5.38
0	-0.0027	0.96	0.42	0	0	0.96	0.42
0.0001	0.0004	0.96	1.06	0	0	0.96	1.06
0.0788	0.8799	0.94	1.43	0.0788	0.88	0.94	1.43
3.3597	1.529	0.96	-1.44	3.36	1.53	0.96	1.44
3.4548	0.3256	0.98	0.85	3.4545	0.323	0.98	0.85
0.0002	0.0009	0.99	0.58	0	0	0.99	0.58
0.0001	0.0009	0.99	7.64	0	0	0.99	7.64
2.877	1.1489	0.99	3.86	2.877	1.15	0.99	3.86
3.2402	0.9226	0.99	1.07	3.2403	0.922	0.99	1.07
2.9505	0.755	0.99	0.61	2.9505	0.755	0.99	0.62
6.594	-1.0307	0.98	6.8	6.594	1.03	0.98	6.8
0.0002	0.0009	1.02	9.13	0	0	1.02	9.13
2.5988	0.8453	1.02	8.91	2.5988	0.846	1.02	8.91
1.4595	0.1699	1.01	1.78	1.4595	0.17	1.01	1.78
2.1629	0.2761	1.01	6.26	2.163	0.276	1.01	6.26
2.9767	0.2691	1.02	9.51	2.9768	0.269	1.02	9.51

표 2. 시뮬레이션 결과 비교

	PSS/E와 고장복구 시뮬레이터 결과 비교
유효전력 최대오차	0.0008[PU] (0.07MW)
유효전력 RMS 오차	0.000401[PU]
무효전력 최대오차	0.003[PU] (0.32Mvar)
무효전력 RMS 오차	0.00202[PU]
모선전압 최대오차	0.0000[PU]
모선전압 RMS 오차	0.0000[PU]
위상각 최대오차	0.01[PU]
위상각 RMS 오차	0.008167[PU]

4. 결 론

본 논문은 사고 상황에 대한 신속하고 정확한 복구과정의 모의를 위한 교육 시스템을 개발하는 것으로써, PSS/E와 같은 상용 프로그램에서는 예정된 시나리오에 의한 모의만을 수행함으로써 인하여 사용자의 임의 제어가 불가능 하였으나, 개발된 교육 시스템은 임의의 제어 및 실시간 모의가 가능하도록 함으로써 사고에 대해 능동적으로 대처할 수 있는 능력을 배양할 수 있다. 또한 정태 해석 프로그램에 GUI기능을 첨가하여 사용이 편리하도록 개발하였으며, 계통변경시 GUI 및 DB를 수정할 수 있도록 하였다.

본 시스템은 운용자의 훈련뿐만 아니라 실제 정전사고의 발생시 운용자의 의사결정 지원용으로도 활용될 수 있을 것으로 보인다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Kearsley, "Restoration in Sweden and Experience Gained from the Blackout of 1983", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 2, No. 2, pp. 422-428, May 1987.
- [2] J. A. Huang et al., "Power System Restoration Incorporating Interactive Graphics and Optimization", IEEE Proc. on PICA Conference, May 1991.
- [3] R. F. Chu et al., "The Uses of an Operator Training Simulator for System Restoration", IEEE Proc. of the PICA Conference, pp. 171-177, May 1991.
- [4] M. E. Cooper et al., "Bulk Power System Restoration Training Techniques", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 8, No. 1, pp. 191-197, Feb. 1993.
- [5] G. Müller et al., "Experiences Using the Dispatcher Training Simulator as a Training Tool", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No.3, pp.1126-1132, August 1993.
- [6] J.M.Bucciero et al., "Dispatcher Training Simulators Lessons Learned", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 6, No. 2, pp. 594-601, May 1991.
- [7] M. M. Adibi et al., "Power System Restoration A Task Force Report", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 2, No. 2, pp. 271-277, May 1987.
- [8] M. M. Adibi et al., "Power System Restoration A Second Task Force Report", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 2, No. 4, pp. 927-933, November 1987.
- [9] M. M. Adibi et al., "Power System Restoration Issues", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 4, No. 2, pp. 19-24, April 1991.
- [10] M. M. Adibi et al., "Special Consideration in Power System Restoration The Second Working Group Report", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 9, No. 1, pp. 15-21, February 1994.
- [11] M. M. Adibi et al., "Reactive Capability Limitation of Synchronous Machines", IEEE Trans. on PWRs, Vol. 9, No. 1, pp. 29-40, February 1994.