광역정전 복구를 위한 시송전 계통 분석시스템 개발

이남호*, 송인준, 김경호, 추진부
한국전력공사 전력연구원

Development of the Primary Restorative Transmission System Analyser to Restore Massive Blackout

Nam-ho Lee, In-Jun Song, Kyeong-Ho Kim, Jin Boo Ghoo
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - Service restoration following a complete or partial collapse starts with reenergizing a transmission line from black-start generators. Voltage problems can arise from Ferranti effect as unloaded transmission line is reenergized. This Paper presents system analyser to develop for verifying the primary restorative transmission system. The algorithm which has been used in the analyser is to handle load pick-up compensating Ferranti effect, and terminal voltage and reactive capability limitation of black-start generators about self-excitation.

1. 서 론

국내의 복구지침은 유럽의 선진국들과 마찬가지로 전정전 또는 광역정전의 발생시 신속한 복구를 위해 7개의 지역계통으로 구분하여 자체기동발전기로 시송전 계통을 가압한다. 그리고 각 지역계통별 발전력과 부하를 일정 수준 회복한 이후 계통연계를 수행하고 정전부하를 완전히 복구하는 방법을 사용한다. [1][2][3]

시송전 계통의 구성조건은 자체기동이 가능한 발전소, 전원의 공급시 기동시간이 빠르고 용량이 큰 우선공급발전소, 이를 연결하는 송전선로의 세가지를 구비하여야 한다. 그러나 자체기동발전소와 우선공급발전소가 결정되었다하여도 자체기동발전소가 우선공급발전소까지의 무부하 선로를 가압할 수 있는지의 여부는 검토되어야 한다. 전력연구원 계통안정화그룹에서는 "전력계통 고장복구 및 지원교육 프로그램 개발" 연구과제와 관련하여 기존 발전기의 단락비를 사용한 분석방법보다 정확성을 향상시키고 부하 투입시 진상무효전력의 상쇄효과를 고려한 새로운 시송전 계통 해석방법을 개발하였다.[4][5] 본 논문은 윈도우즈 프로그래밍과 데이터베이스를 적용하여 시송전 계통의 선정 및 변경에 대한 검토에 활용할 수 있는 사용자 편의 기능의 시송전 계통 분석 시스템의 설계와 구조를 소개 하고자한다

2. 본 론

시송전 선로의 충전용량과 발전기의 진상무효전력 한계치를 비교하여 시송전의 적정성을 판정하는 해석방법은 시송전 계통을 정밀하게 분석할 수 있으나 계산과정이 복잡하여 수계산이 곤란하고, 또한 앞으로의 부하증가와 더불어 시송전 계통의 변화가 있을 것이므로 현장 운용자들이 용이하게 사용할 수 있는 윈도우즈 환경의 분석시스템이 필요하다. 개발된 시송전 계통 분석시스템은 GUI(Graphical User Interface), 시송전 분석 모듈, DataBase 관리모듈로 구성되었고 Visual Basic, C++ win API등의 프로그램 언어를 사용하여 구현되었다. 분석시스템은 MDI형식을 사용하여 다중창이 아닌 페이지 형식으로 화면을 진행시키고, 모든 동작은 마우스와 버튼의 클릭을 이용한다. 그림 1은 시송전 계통 분석시스템에 적용된 알고리즘과 시스템의 흐름도를 보여준다.

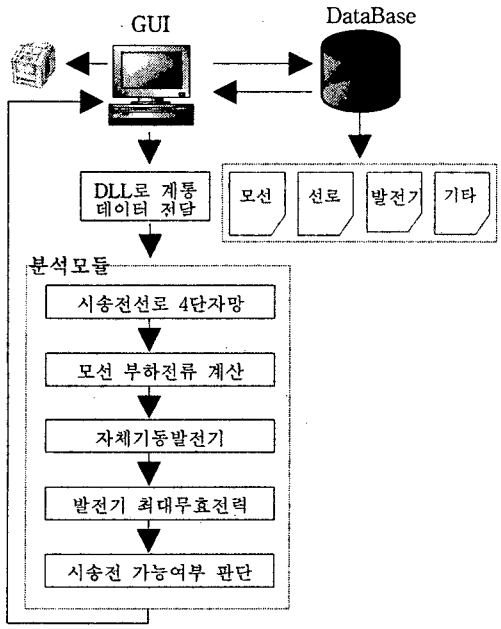

그림 1 시송전 계통 분석시스템 구성도

2.1 시송전 계통 분석 모듈

시송전 선로의 정특성 해석으로는 페란티 효과의 영향을 줄이기 위한 변전소에서의 부하투입, 자체기동발전기의 현상과 관련된 선로 충전용량 등이 있다. C++로 구현된 시송전 계통 분석 알고리즘은 GUI에서 분석명령을 받게 되면 해당 시송전 계통의 DB를 그림 1과 같이 DLL(Dynamic Link Library)로 전달받아 시송전 가능여부를 판단하여 다시 GUI에 분석결과를 전달한다..

2.1.1 변전소 부하투입을 고려한 발전단 전압계산

그림 2는 2대의 자체기동발전기와 승압변압기, 다수의 시송전 선로 구간으로 구성된 모의 시송전 계통도이다. 그림에서 보듯이 각 버스에서의 부하 투입을 임의로 지정할 수 있으며, 발전기 소내 부하는 승압변압기 2차측, 즉 전압 V_1으로 표시된 버스로부터 공급된다. 우선공급발전소가 위치한 시송전 선로의 말단전압 V_{end}를 결정하면, 시송전 조건에서 $I_{RN} = 0$ 이므로, 이를 기점으로 각 버스의 전압과 요구되는 발전기 출력전압 및 자체기동발전기의 공급진상 무효전력을 다음과 같이 구할 수 있다. 선로는 Π모형을 사용하였고, 전압과 전류 및 임피던스는 그림 2에 표시된 바와 같으며, $L_{station}$은 발전소의 소내부하(통상 5%정도)를, V_g는 발전기의 단자전압을

나타낸다. V_N 과 I_{SN} 을 V_{end}, I_{RN} 과 해당 선로구간의 4단자망(Π등가 사용)으로부터 식(1) ~ (3)을 사용하여 구한다.

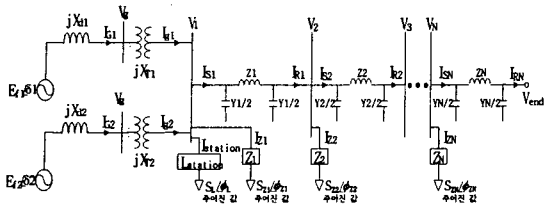

그림 2 모의 시송전 계통도

시송전이므로 I_{RN}은 0이며, V_{end}는 지역에 따라 93~100% 정도를 설정한다.

$$\begin{bmatrix} V_N \\ I_{SN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+\frac{ZN\cdot YN}{2} & ZN \\ YN\left(1+\frac{ZN\cdot YN}{4}\right) & 1+\frac{ZN\cdot YN}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{end} \\ I_{RN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Z_N = \left(\frac{|V_{Nrated}|^2}{S_{ZN}\angle\phi_{ZN}}\right)^* \quad (2)$$

$$I_{ZN} = \frac{V_N}{Z_N} \quad (3)$$

무부하 상태에서 송전선로를 가압하게 되면, 페란티 효과에 의해 선로 말단으로 갈수록 전압이 상승하여 수전단(우선공급발전소에 인가되는 전압)에 과전압을 야기할 수 있다. 이는 각 변전소의 버스나 변압기, 그리고 우선공급 발전기의 절연내력 문제와 직결되므로 선로의 모든 구간에 인가되는 전압을 운용한계치 내로 유지할 수 있는 발전단 전압을 구하며, 이는 시송전 선로 각 구간에 대한 4단자회로 계산을 통해 식 4와 같이 구할 수 있다.

$$V_g = V_1 + (I_{S1} + I_{station} + I_{Z1})\left(\frac{jX_{T1}\cdot jX_{T2}}{jX_{T1}+jX_{T2}}\right) \quad (4)$$

2.1.2 발전기 무효전력 공급 한계 계산

시송전 선로의 충전용량은 선로 어드미턴스와 이에 인가되는 전압과의 관계에서 구할 수도 있지만, 이는 선로와 변압기의 인덕턴스 성분이나, 변전소에서 투입하는 지상 역률 부하의 지상 무효전력 상쇄 효과를 고려하지 못한다. 즉, 선로, 변압기, 부하의 모든 성분을 고려한 충전용량은 자체기동발전기에서 공급하는 진상 무효전력과 같다. 자기여자방지를 위해서는 선로 충전용량보다 발전소에서 공급할 수 있는 무효전력이 커야 하며, 이 공급가능 무효전력은 발전기 회전자의 종류에 따라 다르다. 또한, 자체기동발전기의 고정자 말단 철심과열 문제로 인한 한계값($Q_{\lim}$)이 주어지고, 이 값이 다음에서 구할 자체기동발전소의 공급가능 무효전력보다 작을 경우는 $Q_{\lim}$을 무효전력 발전 한계로 설정한다. 시송전 계통의 자체기동발전소는 대부분 기동시간이 빠른 수력발전기가 선정되어있다. 따라서 시송전 계통 분석모듈은 화력발전기에 사용하는 원통형(비돌극기) 회전자를 적용하지 않고 돌극기 회전자를 적용한 수력발전기의 가용최대진상 무효전력을 식 5와 같이 구한다

$$Q = \frac{P}{\tan\delta} - \frac{V^2}{X_q}$$

$$Q_{\max} = -\frac{V^2}{X_q} \quad (5)$$

2.2 DB를 통한 시송전 계통 데이터 관리

시송전 계통을 분석하기 위해서는 발전소, 모선, 선로 등의 데이터가 필요하며 이에 대한 데이터 관리는 매우 중요하다. 현재 전력계통에 응용되는 컴퓨터 소프트웨어의 데이터는 관계형 데이터베이스인 RDBMS(Relation DataBase Management system)로 구축되는 추세이다.

개발된 시송전 계통 분석 시스템도 사용되는 모든 데이터를 관계형 DB로 설계하여 7개지역(경인북부, 경인남부, 중부, 호남, 영동, 영남, 제주)의 시송전 계통 데이터를 관리하고 있다. 최초 DB를 구축할 경우 시송전 계통의 모선과 자체발전기가 소규모인 것을 감안하여 20모선, 10기발전기로 제한하고 있다.

시송전계통의 DB구조는 모선데이터, 선로데이터, 발전기데이터, 기타데이터의 4가지 항목으로 구성되어 있고 각 항목에는 시송전 계통 분석을 위한 선로정수, 자체기동발전소, 우선공급발전소 및 모선의 부하데이터를 가지고 있다. 모선데이터는 모선번호를 primary key로 선정하고 모선데이터와 선로데이터는 모선번호를 통해 관계형으로 설정되어있다. 선로데이터는 시작모선을 지정하여주면 시작모선을 기준으로 우선공급발전소까지 자동으로 정렬해주는 방식으로 설계하였다. 발전소데이터도 모선과 마찬가지로 발전소번호를 primary key로 하여 10기 이내의 발전기데이터와 관계형으로 설정되어있다. 기타데이터 항목은 수전단 전압, 모선수, Base전압 등 사용자 입력에 대한 데이터를 관리하고 있다. DB관리는 GUI를 통해서 수행하며 그림 3의 오른쪽 화면에서는 현재 불러온 시송전 계통의 DB 전체를 한화면에 보여준다.

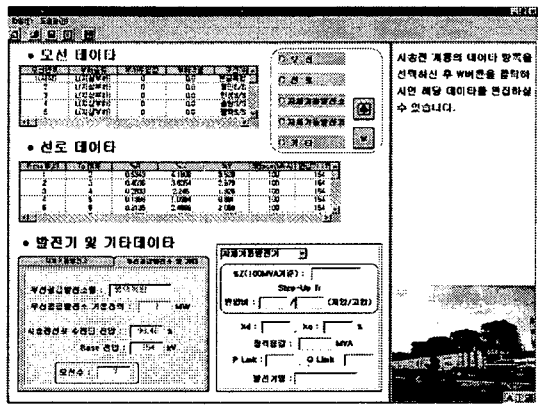

그림 3 DB관리 프로그램

그림 4는 DB 입력 및 편집을 할 수 있는 GUI 화면을 보여준다. 사용자는 우측의 라디오버튼을 통해 원하는 DB항목을 선택하여 해당 편집창을 통해 데이터를 편집할 수 있다.

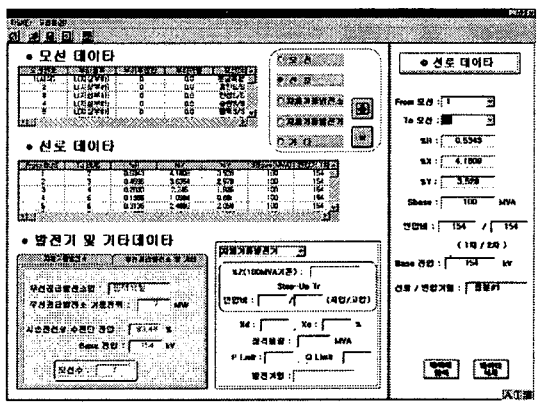

그림 4 DB 편집창

2.3 사용자 편의 기능의 GUI

윈도우즈 환경의 GUI는 시송전 계통을 분석하는 데 있어 사용자에게 편리성과 컴퓨터와의 친숙함을 제공해야 한다. 따라서 개발된 분석시스템은 사용자가 키보드를 통한 타이핑을 최소화하고 마우스를 이용해 시스템을 동작할 수 있도록 설계되었다. GUI의 구현은 윈도우즈 프로그램 언어인 Visual Basic을 사용하였고 시송전 계통 분석을 위한 제어입력 창은 그림 5와 같다.

그림 5에서 보여지는 계통도는 DB의 모선과 선로 데이터를 이용하여 자동으로 그려지며, 최대 20모선까지 화면상에 표현되어 진다. 그림 하단부의 Grid창은 선로데이터를 보여준다. 시송전 계통 분석시 선로데이터를 변경해서는 안되기 때문에 제어입력창에서는 편집기능이 없고 다만 해당 계통에 대한 선로정보를 검색하는 기능만을 수행한다. 시송전 계통 분석을 위한 제어기능은 각 모선별 부하투입량과 역률 그리고 수전단 전압의 %값이다. 분석 시스템의 GUI는 입력시 타이핑과 마우스제어를 동시에 사용할 수 있는 특징이 있다.

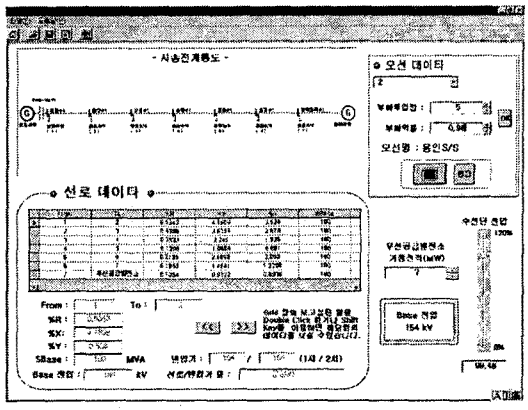

그림 5 시스템 제어입력을 담당하는 GUI 화면

시송전 계통 분석명령을 GUI를 통해 전달하면 GUI는 API함수를 구동시켜 시송전 분석모듈에 해당 계통데이터를 DLL로 전달한다. 분석모듈에서 결과데이터가 동일 방식으로 전달되면 GUI는 그림 6과같이 시송전 계통에 대한 분석결과를 보여준다. GUI는 자체기동 발전소의 발전기를 콤보박스를 통해 선택해주면 발전기가 공급가능한 무효전력량, 현재 공급하는 무효전력량, 공급마진을 도표를 이용해 보여준다.

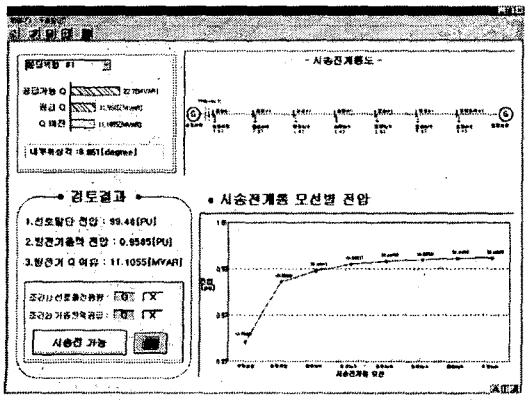

그림 6 분석결과를 보여주는 GUI 화면

그리고 각 모선별 전압을 자동 스케일 기능이 있는 그래프로 보여줌으로 사용자에게 시송전시 발생하는 전압상승에 대한 이해와 전압상승을 상쇄하기위한 모선투입량 결정에 도움을 준다. 계통의 시송전 가능여부의 분석결과는 그림 6의 하단부와 같이 보여주고 사용자는 결과에 따라 시송전 계통의 제어입력창으로 되돌아가 다시 분석명령을 실행할 수 있다. 또한 시송전 분석시스템은 분석결과를 GUI상의 자동 보고서기능을 통해 프린터로 출력 및 파일로 보관할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서 소개한 시송전 계통 해석방법은 선로의 충전용량과 발전기의 진상무효전력 한계치를 비교하여 시송전의 적정성을 판정하는 기준으로서, 간단하고도 실용적인 방법이다. 개발한 시송전 계통 분석시스템은 데이터베이스 관리시스템과 사용자 편의의 GUI를 제공하여 현장 운용자들이 쉽고 간편하게 사용할 수 있다. 또한 시송전 계통 해석방법에 의해 선로의 전압상승률과 충전용량, 발전기에서 공급할 수 있는 무효전력을 계산하여 이미 선정되어 있는 시송전 계통의 시송전 가능 여부를 미리 타진하는 것뿐만 아니라, 향후 추가 되거나 변경될 시송전 계통을 용이하게 분석할 수 있다. 시송전 계통의 정확한 분석과 해석결과를 바탕으로 신뢰성 높은 복구방안 수립은 물론 국내 전정전 또는 광역정전 발생시 신속하고 안정된 정전복구를 통해 국가경제와 사회전반에 파급되는 영향을 최소화할 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

[1] M. Adibi, P. Clelland, L. Fink, H. Happ, R. Kafka, J. Raine, D. Scheurer, F. Trefny, "Power System Restoration - A Task Force Report" IEEE Trans. on PWRS, Vol. 2, No. 2, May 1987

[2] Gaston Morin, "Service Restoration Following A Major Failure On The Hydro-Quebec Power System" IEEE Trans. on PWRD, Vol. 2, No. 2, pp. 454-462, April 1987.

[3] E. Mariani, F. Mastroianni, V. Romano, "Field Experiences In Reenergization Of Electrical Networks From Thermal And Hydro Units", IEEE Trans. on PAS, Vol. 103, No. 7, pp. 1707-1713, July 1984.

[4] 이홍재 외 7인, "Analysis of the Primary Restorative Transmission System", ICEE 2002, July 2002

[5] 이명래 외 7인, "전력계통 고장복구 및 지원교육 프로그램 개발에 관한 연구(중간보고서)", 전력연구원 TM 615, 2001.12

[6]이남호,"보호계전 종합환경을 위한 HMI 개발", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, PP200-202, July 2000