

전력 계통 이상 상태 Guidance System 개발

오승렬* 백영식* 김정년** 한무호***
 경북대학교* LG전선(주)** 포항산업과학연구원***

A Development of On-Line Guidance System for Power System.

Seung-Ryle Oh* Young-Sik Baek* Jung-Nyun Kim** Moo-Ho Han***
 Kyungpook National Univ* LG Cable Ltd.** Rist***

Abstract - Recently, the power system has a trend of a sustaining growth in electric power demand with large-sized formation. In this situation, current states can be definitely comprehended to operate security and economic power system. Also, corrective actions must be performed for the violation of bus voltage and line overload. In the security and economy with on-line, It is desirable that the situations of violation are promptly removed to operate power system effectively. This paper deals with the development of application, Kanyang Steel Works' Power System Guidance System, for voltage and overload correction on base case using Generator-Voltage Sensitivity List(GVSL) and Generator Shifter Factor List(GSFL). Also, to show the superiority and economical efficiency of the proposed application, we simulate the Kanyang Steel Works' Power System.

1. 서 론

현재 전력 계통은 대형화와 함께 전력 수요 또한 지속적으로 증가하는 추세에 있다. 이러한 상황에서 수요자의 요구 충족과 함께 안전적이고 경제적인 계통 운용을 위해서는 항상 변화하는 시스템 상황에 대해서 현재 상태를 명확하게 파악 할 수 있어야 하며, 모선의 전압 위배 또는 선로 과부하에 대한 적절한 조치가 행해져야 한다. 지금 까지 이러한 위배 상태를 해결하기 위해 선형·비선형 등의 다양한 최적화 기법이 연구되어 왔으나 이와 같은 방법들은 대규모 계통에서의 계산 시간상의 비효율성으로 인해 온라인 적용에 대한 문제점을 안고 있다. 대규모 전력 계통에서 운전자 상황 판단의 지침이 되는 Decision Support System을 구성하기 위해서는 크게 두 가지 측면에서 해결되어야 할 문제점을 안고 있는데, 우선 시간적인 면에서 실시간 시스템이 될 수 있어야 하며, 시스템을 구성함에 있어 복잡하고 다양한 전력 계통의 구성 요소들의 특성과 현재 상태 그리고 서로간의 연결 상태를 정확하게 프로그램 상에 구현하고 인식하는 일이다. 이를 위해 이 논문에서는 객체 지향 기법을 이용하여 대상 시스템의 물리적인 최소 단위를 객체로 모델링하여 이를 연결하는 방법을 제시한다. 또한 시간적인 면에서의 효율성을 위해 각 개체들간의 민감도를 이용하여 위배 상태를 벗어나기 위한 적절한 제어 장치 선택과 변화량을 결정하는 방법을 제시하며, 실제 이러한 방법의 효율성과 타당성을 보이기 위해 광양 제철소 전력 계통의 시뮬레이션 결과를 사례 연구로 제시한다..

2. 본 론

2.1 Guidance System 정식화

2.1.1 전력 조류 계산

먼저 실시간 Guidance System이 이루어지기 위해서는 계통 상태에 따른 빠른 조류 계산과 Corrective Action

이 이루어져야 한다. 제안한 알고리즘에서는 Sparsity를 이용한 Fast Decoupled Load Flow Method를(FDLF) 이용하였으며, 각각의 위배 상태에 대한 Corrective Action은 민감도를 이용함으로써 계산 시간상의 효율성을 가져올 수 있다. 아래의 식은 FDLF에서 보정 벡터를 구하는 두 식을 나타낸 것이다.

$$\Delta P/V = -[B'] \Delta \theta \quad (1)$$

$$\Delta Q/V = -[B''] \Delta V \quad (2)$$

여기서,

$\Delta P, \Delta Q$: 유/무효 전력 편차 벡터, θ, V : 상태변수.

B' : $Y_{Bus} = G_{Bus} + jB_{Bus}$ 의 허수 부분.
 $(NB-1) \times (NB-1)$

B'' : $Y_{Bus} = G_{Bus} + jB_{Bus}$ 의 허수 부분.
 $(NB-NPV-1) \times (NB-NPV-1)$

NB : 총 모선수, NPV : 전압 제어 모선수.

2.1.2 발전기 무효 전력에 의한 부하 모선 전압 제어

모선의 전압을 적정 수준으로 유지하기 위해서는 변화하는 부하에 대한 무효 전력의 수급 조건을 만족시켜야 하는데, 이러한 측면에서 볼 때 실제 발전기 모선에서 무효 발전력의 변화는 부하 모선에서의 전압 변화를 초래하므로 두 개체간의 민감도를 이용해 발전기 상태를 변화시킴으로써 부하 모선의 전압을 제어할 수 있다. 실제 계통에서 발전기의 운전 방식은 크게 3가지로 나누어지는데 첫째, 역률 자동 조정 운전(APFR Mode)과 둘째, 전압 자동 조정 운전(AVR Mode) 그리고 마지막으로 무효 전력 자동 조정 운전(AQR Mode) 방식이다. 역률 자동 조정 운전 방식에서 부하 모선의 전압 제어는 발전기의 무효 전력 발전량 즉, 발전기 역률 조정에 의해 이루어진다. 식(2)에서 발전기 모선의 무효 발전력 변화량 ΔQ_i 에 대하여 부하 모선에서의 전압 변화량 ΔV_i 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$\Delta V_i = S \cdot \Delta Q_i = - [B_{exp\ end}]_{ij}^{-1} \cdot \Delta Q_j / V_j \quad (3)$$

$[B_{exp\ end}]$: $Y_{Bus} = G_{Bus} + jB_{Bus}$ 의 허수 부분.
 $(NB-NAVR-1) \times (NB-NAVR-1)$

$NAVR$: 전압제어 모선 중 AVR운전 발전기 모선수

여기서, $[B_{exp\ end}]_{ij}^{-1}$ 은 $B_{exp\ end}$ 역행렬의 i 행 j 열 원소

2.1.3 발전기 유효 전력 변화에 따른 선로 조류 변화.

발전기 모선의 유효 전력량의 변화 ΔP_k 는 $i-j$ 모선 사이의 선로 조류를 변화시킨다. 이는 ΔP_k 에 의해 각각 i, j 모선의 위상 변화를 가져오며, 이로 인해 $i-j$ 모선간의 선로 조류의 변화가 발생하게 된다. 이때 선로 조류 변화량을 ΔP_{ij} 라 하면, 식(2)에 의해 민감도 S 는

$$S = \frac{\Delta P_{ij}}{\Delta P_k} = \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_k} = \frac{\partial (V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j) / x_{ij})}{\partial P_k} \quad (4)$$

여기에서 $|V_i| \approx 1, |V_j| \approx 1, \sin(\theta_i - \theta_j) \approx (\theta_i - \theta_j)$ 이라고 가정하면 위 식은 다음 식과 같이 표현할 수 있게 된다.

$$S = \frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{\partial(\theta_i - \theta_j)}{\partial P_k} = \frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{\partial \theta_i}{\partial P_k} - \frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{\partial \theta_j}{\partial P_k} \quad (5)$$

$$= \frac{x_{ki}}{x_{ij}} - \frac{x_{kj}}{x_{ij}} = \frac{x_{ki} - x_{kj}}{x_{ij}}$$

위 식의 최종 형태를 ΔP_{ij} 에 대해 정리하고 FDLF에서 이용되는 B' 행렬의 원소를 활용하기 위해 리액턴스 부분을 변형하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta P_{ij} = S \cdot \Delta P_k = ([B']^{-1})_{ik} - [B']^{-1}_{jk} \cdot b_{ij} \cdot \Delta P_k \quad (6)$$

2.2 Guidance System 구조

Guidance System은 개체 지향 기법을 이용한 전력 조류 계산과 또한 각 개체들 간의 민감도에 기반을 두고 이루어졌으며, 이는 실제 전력 계통 구성 요소들의 특성과 요소들간의 연결 구조상의 특성을 보다 세밀하게 프로그램 상으로 구현 할 수 있도록 하였다. 일반적으로 모션 전압, 선로 조류 Control에 사용되는 요소들은 발전기 유효/무효 전력, Switchable Shunt Var Compensators(SVC), On Load Transformer Taps (OLTC) 등이 주로 사용되고 있으나, 광양 제철소 Guidance System에서는 시스템 특성상 선로 조류에 관한 부분은 발전기의 유효 전력과 선로간의 민감도를 이용하였으며, 모션 전압에 관한 부분은 발전기 무효 전력과 부하 모션간의 민감도를 이용하였다. Guidance System의 가장 중요한 부분은 실시간 프로그램을 가능케 하여 계통 운전자로 하여금 운전 조건에 따른 계통 상황을 감시하게 하며, 앞으로의 발생할 수 있는 위험 상황에 대해 미리 대처하며, 현재 계통의 상태를 보다 안정적으로 운용할 수 있도록 하는 것에 그 목적이 있다. Guidance System의 전체적인 구조는 RTU에 의해 실시간 데이터가 저장되고 있는 SQL Server로부터 OLE DB를 이용하여 시스템 데이터를 읽어 들인 후 Base Case에 대한 전력 조류를 수행한 다음 전압, 선로 조류에 대한 위배 사항 체크와 각각의 경우에 대한 Guidance를 Local Database에 단계별로 저장하는 구조로 이루어져 있다.

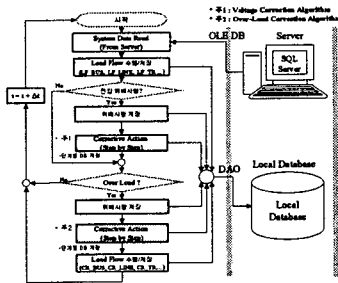


그림 1 Guidance System 구조

2.3 Voltage Correction Algorithm.

현재 계통 상태에 대한 전력 조류 계산이 수행된 다음 적정 수준의 전압 범위를 벗어난 모션이 발생했을 경우 다음과 같은 알고리즘에 의한 Voltage Corrective Action이 수행된다. 이 단계에서 발전기의 무효 전력 변화량은 민감도에 의해 결정, 수행되는 모든 절차들은 데이터 베이스에 단계별로 저장되며, 이는 현재의 전압 위배 상태를 회피 할 수 있는 Guidance 역할을 하게 된다. 또한 이용 가능한 모든 발전기으로써 전압 제어가 불가능할 경우 부하 차단 요구 메시지를 발생시키며, 이에 따른 부하 제한 장치의 가동 여부는 계통 운용 여건에 맞개끔 운전자에 의해 결정된다. 현재 광양 제철소 내의 부하 제한 장치로는 주 차단 장치인 SSC(System Stabilizing Controller)와 후비 보호 장치 LLE(Load Limit Equipment)가 설치되어 있는 상태이다. 아래의 그

림은 Voltage Correction Algorithm을 Flow Chart 형식으로 나타낸 것이다.

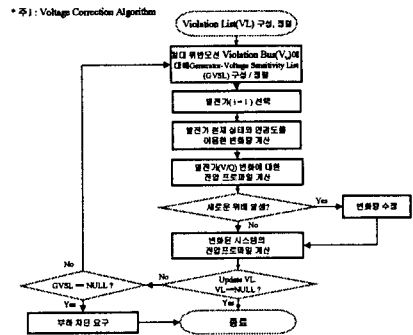


그림 2 전압 교정 플로우 차트

2.4 Overload Correction Algorithm.

광양 제철소 154[kV] 계통은 약간의 루프형 구조를 띠고 있다. 기존의 한전 154[kV] 전압 수준에서 2003년 하반기 345[kV] 전압을 신수전 변전소를 통하여 수전 할 계획에 있으며, 그 외에 제선, 해안, 서부 변전소에서 자체 수급 후 잉여 전력은 상대적으로 발전 설비가 없으며, 부하가 많은 압연 변전소로 전송되어진다. 정상 운전 조건하에서는 모든 Tie Line에 과부하가 발생하지 않지만, 변전소별 복수 Tie Line 중 1선이라도 휴지 시에는 계통 운전 상태에 따라 선로 과부하가 다양하게 발생하게 되며, 또한 제선, 해안 변전소의 Steam Turbine 발전기의 발전력이 부족하여 압연 변전소를 포함한 자체 부하의 수급 불균형이 발생할 경우 한전 수전량이 많아지면서 신수전 변전소와 수전 변전소간의 Tie Line과 서부 변전소와 압연 변전소간의 Tie Line에 경미한 과부하가 발생하게 된다. 이 경우 복수 Tie Line 중 1선 탈락 시에는 나머지 선로에 심각한 과부하를 초래하기 때문에 발전력 재분배를 통해서 Tie Line에 적정 수준의 조류를 유지하는 것이 바람직하다. 그림6은 Overload Correction Algorithm을 Flow Chart 형식으로 나타낸 것이다.

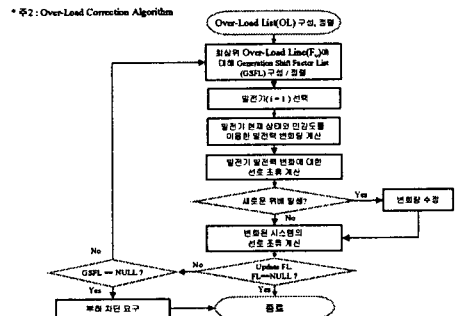


그림 3 과부하 교정 플로우 차트

2.5 사례 연구

2.5.1 IEEE 14모션 계통 적용.

아래의 표는 IEEE14모션에 대한 조류계산 수행 결과를 나타낸 것이다. 먼저 베이스 케이스에 대한 조류 계산 수행 결과 테이블을 보면 전압 변동 범위 기준을 0.95[PU]에서 1.05[PU]로 설정할 경우 다수의 모션이 전압 변동 허용 범위를 벗어나 위배 상태에 있지만 Corrective Action을 수행 한 후에는 슬랙 모션을 제외한 모든 모션이 허용 범위 내에 있음을 볼 수 있다.

표 1 베이스 케이스 조류 계산 결과

순	전압 (KV)	유량 (MW)	유량상차 (MW)	유량하차 (MW)	유량상차 (MW)	유량하차 (MW)	유량상차 (MW)	유량하차 (MW)	유량상차 (MW)	유량하차 (MW)
1	1.06	0	0	0	232	1.38	-200	0	200	0
2	1.045	-4.89	21.7	12.7	46	50	-40	50	50	50
3	1.01	-12.72	84.2	18	0	23.4	0	0	0	0
4	1.01227	-12.32	47.8	-3.9	0	0	0	0	0	0
5	1.02003	-8.79	7.6	1.6	0	0	0	0	0	0
6	1.07	-14.24	17.2	7.2	0	12.14	-4	12.14	-4	23
7	1.06081	-13.36	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1.09	-13.36	0	0	0	16.08	-16	16	16	24
9	1.05408	-14.94	28.5	-18.6	0	0	0	0	0	0
10	1.04845	-15.1	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1.0467	-14.8	-3.5	1.8	0	0	0	0	0	0
12	1.02005	-15.1	6.1	1.8	0	0	0	0	0	0
13	1.0511	-15.17	13.9	5.9	0	0	0	0	0	0
14	1.0435	-16.04	14.8	5	0	0	0	0	0	0

표 2 Corrective Action 후 조류 계산 결과

순	전압 (KV)	유량 (MW)	유량상차 (MW)	유량하차 (MW)	유량상차 (MW)	유량하차 (MW)	유량상차 (MW)	유량하차 (MW)	유량상차 (MW)	유량하차 (MW)
1	1.06	0	0	0	232	1.38	-200	0	200	0
2	1.0292	-14.93	21.7	12.7	46	50	-40	50	50	50
3	1.02134	-13.75	84.7	12	0	23.1	0	0	0	0
4	1.00042	-10.19	47.8	-3.9	0	0	0	0	0	0
5	1.00233	-9.87	7.6	1.6	0	0	0	0	0	0
6	1.04618	-14.74	11.2	7.5	0	13.1	-4	13.1	-4	24
7	1.0142	-13.4	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1.09	-13.4	0	0	0	16.08	-16	16	16	24
9	1.05408	-15.13	28.5	-18.6	0	0	0	0	0	0
10	1.04845	-15.36	0	0	0	0	0	0	0	0
11	1.04675	-15.17	2.9	7.2	0	0	0	0	0	2
12	1.01799	-15.65	6.1	1.6	0	0	0	0	0	0
13	1.01024	-15.89	12.3	5.8	0	0	0	0	0	0
14	1.02108	-16.42	14.8	5	0	0	0	0	0	0

표 3 콘트롤 설정 값

Connected	Controller	Base Case	After Correction
Bus 2	Generator Excitation	1.045	1.04
Bus 3	Generator Excitation	1.01	1.01
Bus 6	Generator Excitation	1.07	1.01
Bus 8	Generator Excitation	1.09	0.99
Line 8	Transformer Tap	0.932	0.9195
Line 9	Transformer Tap	0.978	0.9905
Line 11	Transformer Tap	0.969	1.069

표 4 Corrective Action 전·후 결과 비교

	차전압 달성 수 (Stack 오버 레일)	과전압 달성 수 (Stack 오버 레일)	수행 시간 [sec]
Correction 전	0	7	0.01
Correction 후	0	0	0.25

2.5.2 광양 제철소 실 계통 적용

Guidance System의 입력 데이터는 현재 광양 제철소 계통에서 위반 상태를 생성 해내기 위해 임의로 서버의 데이터를 조작하였다. 또한 Guidance System의 실행 기준은 154[kV]모선의 전압 변동 범위가 +/-2[%] 초과시, Tie Line의 조류는 선로 용량의 65[%] 초과 시 실행하도록 설정하였다. 아래의 표는 광양 제철소 134모선에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 각각의 단계에서는 최대 위반 모선 또는 선로에 대해 민감도가 가장 큰 발전기를 선택, 선택된 발전기의 운전 방식에 따라 교정량을 결정하게 된다. 아래의 표 4는 몇 단계의 Corrective Action을 거치면서 모선 저 전압과 선로 과부하가 해소됨을 잘 보여 주고 있다. 단계별로 진행되는 과정에서 발전기 역률 또는 단자 전압의 변화량 결정과 변화되는 시스템 프로파일의 계산은 이들 각 개체간의 민감도를 이용하므로 수행 시간의 효율성을 기대 할 수 있다.

표 5 시뮬레이션 결과

순	모선 ID	유량 (MW)	유량상차 (MW)	유량하차 (MW)	유량상차 (MW)	유량하차 (MW)	유량상차 (MW)	유량하차 (MW)	유량상차 (MW)	유량하차 (MW)
1	1	0	0	0	232	1.38	-200	0	200	0
2	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0
6	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0

표 6 Corrective Action 전·후 결과 비교

	차전압 달성 수 (Stack 오버 레일)	과전압 달성 수 (Stack 오버 레일)	Tie Line 과부하 수	수행 시간 [sec]
Correction 전	6	0	4	1.3
Correction 후	0	0	0	3.0

3. 결론

이 논문에서는 계통 운전자로 하여금 안전적이고 효율적인 계통 운영을 함에 있어 Decision Support System을 구축하기 위한 전반 적인 과정을 다루고 있다. 개발된 알고리즘은 광양 제철소 실 계통에 적용하여 그 효율성과 타당성을 입증하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 첫째, RTDs에 의해 서버에 실시간으로 저장되는 데이터를 얻기 위해서 Provider와 Consumer의 기능이 분리된 OLE DB를 이용함으로써 Provider의 부담 감소와 함께 Client 프로그램의 리소스를 감소시킬 수 있었다. 둘째, 실 계통에 대한 전력 조류 계산을 스파시티를 이용한 FDLF 방법을 이용함으로써 수렴 속도 개선과 함께 계산 시간적인 면에서 효율성을 증가시킬 수 있었다. 셋째, 복잡한 계통 구조를 구성 요소들의 객체화를 통하여 시스템 변화에 능동적이며, 프로그램 상에서 보다 더 실제에 가까운 시스템으로 구현 할 수 있었다. 또한 프로그램을 최소한의 기능으로 모듈화 하여 코드 재사용의 가능성을 높일 수 있었다. 마지막으로 계통 이상 상태, 즉 모선 저 전압, 과 전압, 선로 과부하 등을 해소하기 위해서 각 개체들 간의 민감도를 이용하여 최소한의 동작으로 계통 운영상의 효율성과 함께 계산 시간을 단축함으로써 실시간 적용이 가능하게끔 하였으며, 또한 개발된 Guidance System을 광양 제철소의 전산 시스템에 적용하였다.

(참 고 문 헌)

- Wendy Sarrett, "Visual C++ 6 Database Programming," 정보문화사, 1999.
- 김정년, 백영석 "객체지향기법을 이용한 전력조류계산 및 스파시티 연구", 대한 전기 학회 논문집, pp.519-523, 1995.
- B. Hakavik and A.T. Hølen, "Power System Modelling and Sparse Matrix Operations Using Object-Oriented Programming", IEEE Trans. on Power System, vol. 9, No. 2, May 1994.
- Z. L. Gaing and C. N. Lu, " An Object-Oriented Approach for Implementing Power System Restoration Package", IEEE Trans. on Power System, Vol. 11, No.1 Feb.1996.
- 곽준혁, "실계통 적용을 위한 전력조류계산 프로그램 개발" 경북 대학교 대학원, 2000.
- 이희춘, "광양제철소 전력계통분석 모의실험 및 전산기 적용방안 연구", POSCO, 1999
- Show-Kang Chang, Vladimir Brandwajn, "Adjusted solution in fast decoupled load flow", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, May 1998.
- Bansilal, D. Thukaram, K. Parthasarathy, "An expert system for voltage control in a power system network", IEEE Catalogue No. 95TH8130.
- James A. Momoh, Arunsi U. Chuku, "Application of expert system for improved contingency analysis and optimal correction" Electrical Engineering Department Howard University.
- O. Alsac, B. Stott, W. F. Tinney, "Sparsity-Oriented Compensation Methods for Modified Network Solutions", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.5, May 1983.