

계통 이상상태 가이드스 시스템

서규석* 옥치연* 백영식* 김정년** 한우호***
 경북대학교* LG전선(주)** RIST***

Guidance system for abnormal situations of Power system

Gyu-Seok Seo* Chi-Yun Ok* Young-Sik Baek* Jung-Nyun Kim** Moo-Ho Han***
 *Kyungpook National University **LG Cable Ltd ***RIST

Abstract - Recently, electric power demands tend to be increased continuously. In this situation, current states of power systems must be definitely recognized to operate power systems stably and economically. Also, corrective actions must be performed for the violation of bus voltage and line overload. It is desirable that the situations of violation are promptly removed to operate power systems effectively. This paper deals with the development of 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 applied the proposed guidance system to the Kwangyang Steel Works' Power Systems.

1. 서 론

대규모 수용가에서의 전력의 효율적인 운용은 생산물품의 질과 가격에 큰 영향을 미치는 중요한 문제이나, 아직까지 연구가 미진한 분야이다. 그러나 전력계통의 실시간 제어에 의한 전력의 효율적인 운용은 IT 기술의 발달로 적용 가능하게 되었다. 대규모 수용가에서 운전자 상황 판단의 지침이 되는 판단 지표 시스템(Decision Support System)을 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 구성요소들의 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 모델링 하여 이를 연결하는 방법을 제시한다. 또한 시간적인 면에서의 효율성을 위해 각 개체들 간의 민감도를 이용하여 위배 상태를 벗어나기 위한 적합한 제어 장치 선택과 그 변화량을 결정하는 방법을 제시하며, 실제 이러한 방법의 효율성과 타당성을 보이기 위해 광양 제철소 전력 계통에 적용하여 그 타당성을 보인다.

2. 본 론

2.1 전력 조류 계산

본 논문에서는 계통의 초기상태를 빠르고 정확하게 구하기 위해서 속도 면에서 가장 우수한 고속 분할법(Fast Decoupled Load Flow Method : FDLF)을 채택하였다. 또한 계산 시간의 단축을 위해서 소행렬(sparse matrix)을 적용하고 모션번호 재배열(Ordering)을 통해서 계통의 초기조건을 구하는데 소요되는 시간을 단축시키고자 하였다.

고속 분할법에서 사용되는 전력 편차 방정식은 식(1),(2)와 같다.

$$\Delta P/V = -[B_p]\Delta\theta \tag{1}$$

$$\Delta Q/V = -[B_q]\Delta V \tag{2}$$

여기서,

$\Delta P, \Delta Q$: 유효 및 무효 전력의 편차

$\Delta\theta, \Delta V$: 위상 및 전압크기보정벡터

B_p : Y_{Bus} 의 허수부분 $(NB-1) \times (NB-1)$

B_q : Y_{Bus} 의 허수부분 $(NB-NPV-1) \times (NB-NPV-1)$

NB : 총 모선수

NPV : 전압제어 모선수

상기의 식으로 각 모선의 위상각 및 전압의 크기의 수정은 식(3), (4)에 의해서 수정한다.

$$\theta_i^{k+1} = \theta_i^k + \Delta\theta_i \tag{3}$$

$$V_i^{k+1} = V_i^k + \Delta V_i \tag{4}$$

각 반복단계에서 $\sum \Delta V_i$ 와 $\sum \Delta\theta_i$ 가 충분히 작아 졌을 경우 수렴하고 중단한다.

2.2 모션전압에 대한 민감도

2.2.1 발전기 무효 전력

전력 계통의 모션 전압은 자동되는 발전기 수와 발전기 무효 전력 발전량에 따라 다르게 나타난다. 실제 발전기는 역률 자동조정 운전(Automatic Power Factor Regulation : APFR)과 전압 자동조정 운전(Automatic Voltage Regulation : AVR)방식이 있다. APFR 방식에서 부하 모션의 전압 제어는 발전기의 무효 전력 발전량 즉, 발전기 역률 조정에 의해 이루어진다. 발전기 모션의 무효 발전력 변화량 ΔQ_i 에 대하여 부하 모션에서의 전압 변화량 ΔV_j 사이에는 식 (5)와 같은 관계식이 성립된다.

$$\Delta V_j = S \cdot \Delta Q_i = -[B_{exp}^{jj}]^{-1} \cdot \Delta Q_i / V_j \tag{5}$$

B_{exp} : Y_{Bus} 의 허수부분 $(NB-NAVR-1) \times (NB-NAVR-1)$

NAVR: 전압제어 모션중 AVR운전 발전기모션수

2.2.2 발전기 단자전압

기동 중인 발전기는 무효 전력 범위 제한 내에서의 발전기 단자 전압을 변화시켜 부하 모션의 전압을 제어할 수 있다. 전압제어 모션의 전압변화에 대한 부하 모션의 전압변화는 간접적인 방법으로 민감도를 얻어 낼 수 있다. 발전기 단자 전압 변화로 인해 해당 모션과 연결된 인접한 부하 모션에서의 무효 전력 유입량이 변화하게 되며, 이들 모션의 무효 전력 유입량의 변화는 아래의 식(6)과 같은 민감도로 나타낼 수 있다. 따라서 최종적으로 제어 대상 부하 모션의 전압 변화량 ΔV_k 는 식(7)과 같다.

$$\Delta Q_i = -b_{ij} \cdot V_j \cdot \Delta V_j \tag{6}$$

$$\Delta V_k = \sum_{i=1}^n S \cdot V_i = - \sum_{i=1}^n [B_{exp}^{ik}]^{-1} \cdot \Delta Q_i \cdot V_i \tag{7}$$

b_{ij} : i모선과 j모선사이의 선로 서셉턴스

Δ : 전압제어 모션과 연결된 인접한 부하모션

식(6)과 (7)을 살펴보면 발전기 단자 전압의 변화는 Δ 모선의 전압 변화를 가져온다. Δ 모선으로 유입되는 무효 전력의 변화량 ΔQ_i 에 대한 임의의 AVR 운전 발전기의 무효 전력 변화량 ΔQ_k 은 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta V_i = -[B_{exp}^{ij}]^{-1} \cdot V_i \cdot \Delta Q_i \quad (8)$$

$$\Delta Q_k = \sum_{j \in \lambda} S \cdot \Delta V_j = \sum_{j \in \lambda} (-b_{jk} \cdot V_j) \cdot \Delta V_j \quad (9)$$

2.2.3 SVC의 무효전력

SVC(Shunt VAR Compensator)는 계통 내의 무효 전력을 공급 또는 흡수하면서 모선 전압을 일정하게 유지하거나 원하는 값으로 변화키는 역할을 수행한다. 위의 식(2)를 이용해서 SVC의 ΔQ_k 변화에 대한 부하 모선의 전압 변화량 ΔV_j 간의 민감도는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta V_j = S \cdot \Delta Q_k = -[B_{exp}^{jk}]^{-1} \cdot \Delta Q_k / V_j \quad (10)$$

2.2.4 변압기 탭(Transformer Tap)

$i-j$ 모선 사이의 OLTC(On Load Tap Changing) 변압기는 가변 탭을 이용하여 모선의 전압을 적정 수준으로 유지하는 기능을 수행한다. 변압기의 탭 변화는 발전기의 무효 전력 발전량의 변화를 가져오기 때문에 이를 이용한 전압 조정은 발전기의 무효 전력 상·하한의 제약을 벗어나지 않는 범위 내에서 이루어져야 한다. $i-j$ 모선 사이의 변압기 탭 변화는 $i-j$ 각 모선에서 $-b_{ij} \cdot \Delta t / t$ 의 무효 전력의 변화가 발생한다. 이를 이용하여 $i-j$ 선로의 변압기 탭 변화에 따른 임의의 부하 모선 k 에서의 전압 변화량 ΔV_k 은 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta V_k = S \cdot \Delta t = ([B_{exp}^{ik}]^{-1} \cdot b_{ij} / t - [B_{exp}^{jk}]^{-1} \cdot b_{ij} / t) \cdot \Delta t \quad (11)$$

2.3 선로조류에 관한 민감도

2.3.1 발전기 유효 전력

제철소 내의 154[kV] 변전소간의 연결 선로(Tie Line)의 탈락 사고는 전체 시스템에 미치는 파급효과가 크기 때문에 이들 선로에 과부하가 발생하지 않는 범위 내에서 유효 전력의 발전이 이루어져야 한다. PV모선의 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 민감도 S 는

$$S = \frac{\Delta P_{ij}}{\Delta P_k} = \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_k} = \frac{\partial(V_i V_j \sin(\theta_i - \theta_j) / x_{ij})}{\partial P_k} \quad (12)$$

여기서, $|V_i| \approx 1, |V_j| \approx 1, \sin(\theta_i - \theta_j) \approx (\theta_i - \theta_j)$ 이라고 가정하면 식(12)는 식(13)과 같이 표현할 수 있다.

$$S = \frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{\partial(\theta_i - \theta_j)}{\partial P_k} = \frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{\partial \theta_i}{\partial P_k} - \frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{\partial \theta_j}{\partial P_k} = \frac{x_{ki}}{x_{ij}} - \frac{x_{kj}}{x_{ij}} = \frac{x_{ki} - x_{kj}}{x_{ij}} \quad (13)$$

식(13)을 식(12)에 대입한 후 ΔP_{ij} 에 대해 정리하고, B_P 행렬의 원소로서 표현하면 식(14)와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta P_{ij} = S \cdot \Delta P_k = ([B_P^{ki}]^{-1} - [B_P^{kj}]^{-1}) \cdot b_{ij} \cdot \Delta P_k \quad (14)$$

2.3.2 위상 변압기(Phase Shifter)

선로에 흐르는 유효 전력은 선로 양단의 모선 전압의 크기보다 위상에 의해 그 크기가 결정된다. $i-j$ 모선 사이의 위상 변압기의 위상 변화는 터미널 모선의 위상 변화로 이어지고 이는 곧 선로에 흐르는 유효 전력의 변화를 가져온다. 위상변압기의 단위 위상 변화에 대한 임의의 k 모선의 위상변화 $\Delta \theta_k$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \theta_k = ([B_P^{ik}]^{-1} - [B_P^{jk}]^{-1}) \cdot b_{ij} \quad (15)$$

따라서, 위상변압기의 $\Delta \phi$ 위상변화에 대한 선로 조류 변화량 ΔP_{ij} 은 다음과 같은 민감도를 가지게 된다.

$$\Delta P_{ij} = S \cdot \Delta \phi = ((\Delta \theta_i - \Delta \theta_j) - N) \cdot b_{ij} \cdot \Delta \phi = \{([B_P^{ii}]^{-1} - [B_P^{jj}]^{-1}) - ([B_P^{ij}]^{-1} - [B_P^{ji}]^{-1}) - N\} \cdot b_{ij} \cdot \Delta \phi \quad (16)$$

단, 여기서 N 은 해당 선로에 위상 변압기가 존재하면 1, 반대의 경우에는 0이 된다.

2.4 가이던스 시스템의 알고리즘

2.4.1 전압위배 해소 알고리즘

전압위배를 해소하기 위한 알고리즘은 아래 그림 1과 같다.

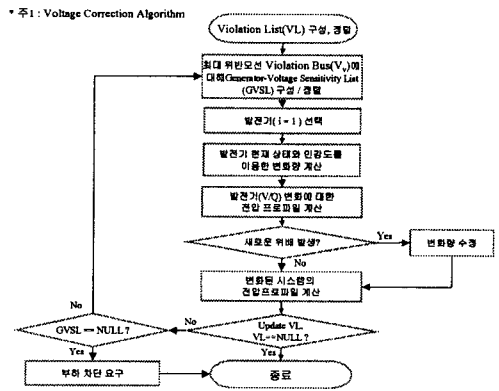


그림 1 전압 교정 순서도

2.4.2 과부하 해소 알고리즘

과부하위배를 해소하기 위한 알고리즘은 아래 그림 2와 같다.

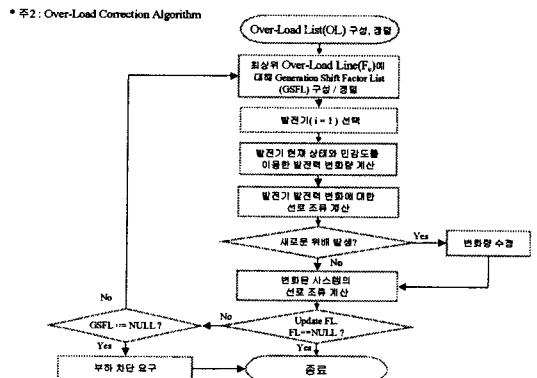


그림 2 과부하 교정 순서도

2.5 실계통 적용사례

2.5.1 대상계통

본 논문에서는 개발된 시스템을 광양제철소에 적용하였다. 그림 3은 광양제철소 단선도를 나타낸 것이다.

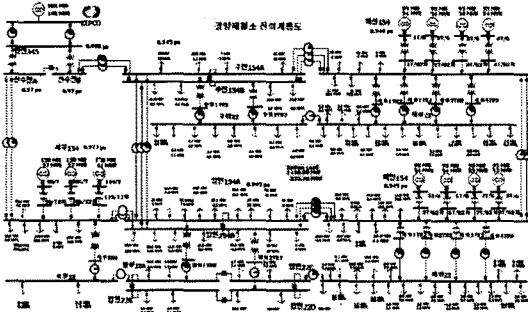


그림 3 광양 제철소 전력 계통도

가이던스 시스템 입력 데이터는 현재 광양 제철소 계통에서 위반 상태를 생성 해내기 위해 임의로 서버의 데이터를 조작하였다. 또한 가이던스 시스템의 실행 기준은 154[kV]모선의 전압 변동 범위가 $\pm 2\%$ 초과 시, 연결 선로의 조류는 선로 용량의 65[%] 초과 시 실행하도록 설정하였다.

2.5.2 모의결과

상기의 계통을 모의한 결과 기저상태에서 6개의 전압위배 모션과 4개의 과부하 선로가 발생하였다. 표 1에서 보는바와 같이 교정절차를 거친 결과 대상계통은 모든 운전조건을 만족하게 되었다.

표 1 교정 조치 전·후 결과 비교

	저전압 모션수	과전압 모션수	연결선로 과부하수	수행시간 [sec]
교정 전	6	0	4	1.3
교정 후	0	0	0	2.7

표 2에서는 표 1과 같이 운전조건을 위반사항이 발생하였을 경우 각 단계별로 교정절차를 나타내었다. 모션 전압 위배와 선로 과부하에 대해 각각 3단계의 교정 조치를 거치면서 기저 상태에서 발생했던 위배 사항이 해소됨을 알 수 있으며 단계별로 진행되면서 계통의 운전조건을 만족해 가는 과정을 볼 수 있다.

표 2 교정조치 절차

NO	PRE AD	EX T	TYPE	U	V	MAX VOLTAGE	VAL	CTRL PCR	CTRL TYPE	PRE STA TE	PFE PCE N	PRE CTRL VALUE	POST STA TE	POST PCE N	POST CTRL VALUE	REQ LONG SHED	
1	<input type="checkbox"/>	1	0	6	0	제한 전압 소 154[kV]	149.25	3 T/G 11[kV]	정압제	0	0	1	70	90		<input type="checkbox"/>	
2	<input type="checkbox"/>	1	0	6	0	제한 전압 소 154[kV]	150.02	1 T/G 11[kV]	정압제	0	0	1	50	11		<input type="checkbox"/>	
3	<input type="checkbox"/>	1	0	4	0	제한 전압 소 154[kV]	150.54	2 T/G 11[kV]	정압제	0	0	1	50	11		<input type="checkbox"/>	
4	<input type="checkbox"/>	1	0	0	0	제한	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<input type="checkbox"/>	
5	<input type="checkbox"/>	2	0	0	4	신속제 <O> 서파제 전소 11	72.0	NO.9 11[kV]	유압 정압제	1	70	70	1	112.5	112.5		<input type="checkbox"/>
6	<input type="checkbox"/>	2	0	0	2	서파 변전소 11	66.7	5 T/G 11[kV]	유압 정압제	1	90	90	1	100	100		<input type="checkbox"/>
7	<input type="checkbox"/>	2	0	0	2	제한 <O> 서파 변전소 11	65.0	6 T/G 11[kV]	유압 정압제	1	90	90	1	100	100		<input type="checkbox"/>
8	<input type="checkbox"/>	2	0	0	0	제한	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<input type="checkbox"/>	

3. 결 론

본 논문에서는 계통 운전자로 하여금 안전적이고 효율적인 계통 운용을 함에 있어 의사판단에 도움을 주는 전력계통 가이던스 시스템에 대해 서술하였다. 개발된 알고리즘은 광양 제철소 실계통에 적용하여 그 효율성과 타당성을 입증하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 계통 이상상태 즉 모션의 전압위배사항, 선로 과부하 등을 해소하기 위해서 각 설비들 간의 민감도를 이용하여 계통 운용상의 효율성과 함께 계산 시간을 단축함으로 실시간 적용이 가능하게 하였다..

둘째, 프로그램의 메모리 사용과 계산시간을 단축하기 위해 기저상태의 전력조류 계산시에는 소행렬을 사용한 고속 분할법을 적용하였으며 단계별로 진행되는 일련의 교정 조치과정에서 변화되는 계통의 상태는 민감도를 이용하여 계산 시간상의 부담을 감소시킬 수 있었다.

셋째, 전력계통을 구성하는 설비들을 시스템의 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 구조로 만들기 위해서 각 설비들을 객체로 모듈화 하였으며 전체 계통의 구성은 객체들의 연결로써 표현하였다. 이러한 구조를 통해서 탐색 및 변경을 용이하게 하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Wendy Sarrett, "Visual C++ 6 Database Programming," 정보문화사, 1999.
- [2] 김정년, 백영식 "객체지향기법을 이용한 전력조류계산 및 스파시티 연구", 대한 전기 학회 논문집, pp.519-523, 1995.
- [3] B. Hakavik and A.T. Holen, " Power System Modelling and Sparse Matrix Operations Using Object-Oriented Programming", IEEE Trans. on Power System, vol. 9, No. 2, May 1994.
- [4] 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.
- [5] 박준혁, "실계통 적용을 위한 전력조류계산 프로그램 개발" 경북 대학교 대학원, 2000.
- [6] 이희춘, "광양제철소 전력계통분석 모의실험 및 전산기 적용방안 연구", POSCO, 1999
- [7] Show-Kang Chang, Vladimir Brandwajn, "Adjusted solution in fast decoupled load flow", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, May 1998.
- [8] Bansilal, D. Thukaram, K. Parthasarathy, "An expert system for voltage control in a power system network", IEEE Catalogue No. 95TH8130.
- [9] James A. Momoh, Arunsi U. Chuku, "Application of expert system for improved contingency analysis and optimal correction" Electrical Engineering Department Howard University.
- [10] 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.